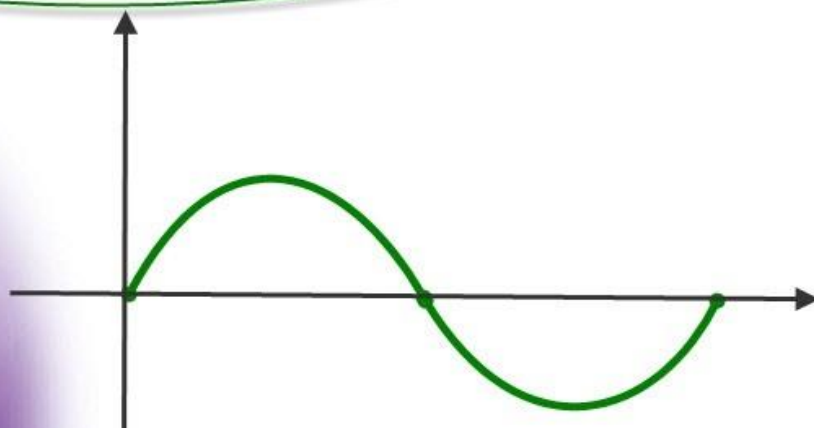


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

## موضوع پروژه:

کنترل فازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین بادی

به روش کنترل مستقیم کشتاور



WikiPower.ir

برای خرید فایل word این پروژه [اینجا کلیک کنید](#).

( شماره پروژه = ۲۸۰ )

پشتیبانی: ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

# کنترل فازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین بادی به روش کنترل مستقیم گشتاور



فرستنده: ابوالفضل مهدی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تقدیم به فهرست

چکیده ۶

مقدمه ۶

فصل اول : ساختار نیروگاه بادی ۸

۱-۱. مقدمه ۸

۲-۱. ساختار باد ۱۴

۱-۲-۱. انرژی باد ۱۴

۲-۲-۱. وزش باد ۱۹

۳-۱. توربین بادی ۲۱

۴-۱. کنترل توربین بادی [۸] ۲۹

۱-۴-۱. اهداف کنترل ۳۰

۲-۴-۱. حالت‌های کارکردی ۳۱

۳-۴-۱. استراتژی کنترل توربین باد VS-VP ۳۲

۵-۱. ژنراتورهای بادی [۸] ۳۵

۶-۱. سیستم کنترل زاویه پره ها ۳۷

فصل دوم : مدلسازی و شبیه سازی ماشین القایی تغذیه دوگانه ۳۷

۱-۲. مدل سازی ریاضی ۳۸

۱-۱-۲. نظریه قاب های گردان [۱۰] ۳۸

۲-۱-۲. مدل qd0 ژنراتوری ماشین القایی تغذیه دوگانه ۴۱

۲-۲. نتایج شبیه سازی ۴۸

۱-۲-۲. عملکرد حالت دائم ۴۸

۲-۲-۲. عملکرد دینامیکی ۶۳

۳-۲-۲. مدل مبنای واحد (PU) ۶۹

۳-۲. روش های کلیدزنی اینورتر ۷۲

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

- ۱-۳-۲. روش کلیدزنی SPWM [۱۵] ۷۵
- ۲-۳-۲. روش کلیدزنی SVM ۷۸
- ۳-۳-۲. مدل کلیدزنی انتخابی ۷۸
- فصل سوم : کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین باد ۷۹
- ۱-۳. طراحی سیستم کنترل WTDFIG به روش کنترل مستقیم گشتاور ۸۰
- ۲-۳. نتایج شبیه سازی با کنترل کننده PI ۸۴
- ۲-۳. نتایج شبیه سازی با کنترل کننده فازی ۹۰
۴. نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۵
- ۱-۴. بحث و نتیجه گیری ۹۵
- ۲-۴. پیشنهادها ۹۷
۵. مراجع ۹۸
- پیوست الف. روشهای کنترل اسکالر و برداری ۱۰۰
۱. روشهای کنترل اسکالر (عددی) [۱۵] ۱۰۰
- ۱-۱. اصول کلی کنترل ماشینهای القایی ۱۰۱
- ۲-۱. کنترل ولت بر هرتز ۱۰۲
- ۳-۱. کنترل گشتاور و شار ۱۰۵
- ۴-۱. کنترل لغزش و جریان مستقل ۱۰۹
- ۵-۱. کنترل بازیافت توان لغزشی ۱۱۱
۲. روش های کنترل برداری [۱۷] ۱۱۲
- ۱-۲. کنترل برداری جهت یابی میدان ۱۱۴
- ۲-۲. کنترل مستقیم گشتاور ۱۲۱
- ۳-۲. مقایسه کنترل جهت یابی میدان و کنترل مستقیم گشتاور ۱۲۵
- پیوست ۲. جعبه ابزار فازی MATLAB ۱۲۶
۱. توابع عضویت ۱۲۶
۲. جدول قوانین ۱۲۷

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

چکیده

ت

مقدمه

استفاده وسیع از توربین های باد برای تولید انرژی الکتریکی در حجم های بالا و نو بودن این تحقیقات در سطح مراکز علمی - تحقیقاتی جهان و توجه داخلی به آینده این صنعت، موجب شد که برای این تحقیق موضوعی در این زمینه انتخاب شود. از میان موارد مختلفی که قابل بررسی بود مانند باد، توربین، ژنراتور، اتصال به شبکه، مزارع باد و موارد دیگر، بررسی نوع بسیار جدید ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین باد که امروزه در صدر تحقیقات قرار دارد انتخاب شد تا به تفصیل مورد بررسی قرار بگیرد.

این ماشین در تحقیقات داخل کشور تا به حال بررسی نشده است اما در سطح جهان این بررسی ها چند سالی است که شروع شده و همچنان ادامه دارد و تقریباً به نقطه مطلوبی از نظر مدل سازی ریاضی رسیده است اما بررسی آزمایشگاهی یا شبیه سازی رایانه ای آن هنوز جای تحقیق دارد. این بررسی جدید به عنوان گام دوم تحقیق در نظر گرفته شد.

به عنوان گام اول و شروع تحقیق تشخیص داده شد که بررسی کافی توربین باد و منحنی های عملکرد آن لازم است. در ابتدا تصور بر این بود که در این زمینه منابع فارسی هم کفایت کند اما در حین کار متوجه شدیم که مقالات انگلیسی نیز بسیار مختصر به موضوع پرداخته شده است و نیاز بررسی بیشتر دارد.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

پس از انجام دو گام اول، هدف طراحی و شبیه سازی مدار کنترلی برای ژنراتور القایی متصل به توربین باد بود که بتواند منحنی بهینه عملکرد توربین را تأمین کند. از میان روش های کنترل ماشین القایی مناسب یعنی کنترل برداری جهت یابی میدان و کنترل برداری مستقیم شار، تنها مورد اول در مقالات خارجی قرار گرفته بود، به همین خاطر با توجه به عملکرد بهتر روش کنترل دوم در ماشین های القایی معمولی تصمیم گرفته شد تا مطابق روش گشتاور مستقیم سیستم کنترل طراحی شود. پس از انجام گام دوم تحقیق و بررسی دو روش کنترل برداری پیش گفته مشخص شد که روش انتخابی بسیار مناسب تر است.

در مورد کنترل کننده ها نیز تحقیقات انجام گرفته تنها بر روی کنترل کننده های تناسبی - انتگرالی معمولی بود و آخرین کار انجام شده از یک کنترل کننده تطبیقی چند پله استفاده کرده بود. با توجه به غیرخطی بودن منحنی عملکرد بهینه توربین باد و غیرخطی بودن ماشین القایی، حدس زده شد که استفاده از کنترل کننده فازی نتیجه بسیار بهتری خواهد داشت.

مسیر تحقیقات مطابق با طرح پیشنهادی انجام گرفته است. بدین صورت که در فصل اول مفصلاً باد و سیستم تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی مرور شده است و منحنی عملکرد بهینه توربین باد و سناریوی کنترل آن مشخص شده است.

در فصل دوم مدلسازی ریاضی ماشین القایی تغذیه دوگانه به تفصیل مرور شده و منحنی های عملکرد آن به شکلی کاملاً جدید و مفید شبیه سازی و بررسی شده است. نتایج جالبی نیز از این قسمت بدست آمده است مانند اینکه مدل زمانی ماشین القایی **MATLAB** در تحلیل تغذیه دوگانه عملکرد صحیحی ندارد و اینکه حد گشتاور تولیدی به سرعت وابسته نیست.

در فصل سوم سیستم های کنترلی متناسب با روش کنترل مستقیم گشتاور برای تحقق منحنی بهینه عملکرد توربین باد طراحی شده و در دو حالت استفاده از کنترل کننده های معمولی و کنترل کننده های فازی مقایسه شده است.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

### فصل اول : ساختار نیروگاه بادی

#### ۱-۱- مقدمه

منابع انرژی های سنتی، سوخت های فسیلی و برق حاصل از شکافت هسته ای و انرژی آبی (بزرگ) (نیروگاه های برق آبی) عملاً بر تصویر عرضه انرژی جهان تسلط دارند. دیگر منابع انرژی هنوز به مقدار کافی توسعه پیدا نکرده اند. در بین این انرژی ها گروهی از انرژی ها هستند که به آنها عنوان انرژی های نوین و تجدید پذیر داده شده است. به عنوان یک گروه مقایسه آنها با انرژی های معمولی مشکل است زیرا که این انرژی ها به طور وسیع توزیع شده و نسبتاً پراکنده هستند. این انرژی ها از نظر تجاری هنوز بطور جزئی توسعه یافته اند. این منابع اساساً نامحدود می باشند. لکن با درک موجود، گران و غیر قابل اعتماد تلقی میشوند. اغلب آنها از نظر زیست محیطی بی خطر بوده یا می توانند بی خطر باشند. لازم است که استانداردهای زیست محیطی قوی در توسعه انرژی تجدیدپذیر، به صورت جزئی از یک فرآیند پیوسته در راستای عرضه و بهره برداری از انرژی در جهان اعمال شود به هر حال هزینه های سرمایه ای به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. برای نمونه هزینه مدول های فتوولتایی بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ به یک دهم کاهش یافته است و در ادامه روند فوق در آینده نیز دور از انتظار نیست. قابلیت اعتماد نیز افزایش خواهد یافت. از آنجا که تعادل بین محیط زیست و اقتصاد انرژی در حال حاضر و در آینده مورد بحث خواهد بود بنابراین امکانات بالقوه و سهمی که این منابع تجدیدپذیر در تأمین انرژی جهان خواهند داشت یک بخش کلیدی برای مباحثات آینده خواهد بود.

انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، بطور گسترده ولی پراکنده در دسترس می باشد. قبل از انقلاب صنعتی بعنوان یک منبع انرژی به میزان زیاد مورد بهره برداری قرار می گرفت ولی انقلاب صنعتی سوخت های فسیلی به دلیلی ارزانی و قابلیت اطمینان بالا جایگزین انرژی باد شدند. با این وجود بحران نفتی باعث ایجاد تمایلات جدیدی در زمینه تکنولوژی انرژی باد جهت تولید برق متصل به شبکه، پمپاژ آب و تأمین انرژی الکتریکی نواحی دورافتاده گردید. در سالهای اخیر مشکلات زیست محیطی و مسأله تغییر آب و هوای کرده زمین به علت استفاده از منابع انرژی متعارف این علایق را تشدید کرده است. همچنین اخیراً مشخص شده که توربین های بادی بخصوص در ابعاد بزرگ و تعداد



## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

زیاد در اماکنی که چشم انداز از اهمیت زیادی برخوردار است، باعث بهم خوردن شدید منظره می شوند. گاه صدای آنها نیز مسأله ساز است.

از قرنهای پیش باد به عنوان منبع انرژی در دریانوردی مورد استفاده قرار می گرفته و ملتها پیشرفت و سعادت خود را مدیون پیشرفتشان در دریانوردی بوده اند. بر اساس مدارک موجود، پیشینه استفاده از انرژی بادی به ۵۰۰۰ سال پیش از میلاد و مسیح و به کشتیهای بادبانی شناور بر رود نیل باز میگردد. طولی نکشید که باد جای خود را در خشکیها نیز باز نمود و تا پیش از رواج موتورهای بخار در نیمه اول قرن نوزدهم، انرژی آبهای روان و باد تنها منابع مهم تولید انرژی به شمار میرفتند.

اولین آسیاهای بادی از نوع محور افقی بوده اند و گفته میشود که هامورابی امپراتور بابل در قرن هفدهم پیش از میلاد برای اجرای طرحهای بزرگ کشاورزی و آبیاری خود تصمیم به استفاده از آسیاهای بادی گرفته است. در حدود ۲۰۰ سال پیش از میلاد مسیح اولین آسیای بادی برای آرد کردن غلات توسط ایرانیان ساخته شد و در جریان جنگهای صلیبی این فن آوری به اروپا انتقال پیدا نمود. گفته میشود که در قرن هفتم پس از میلاد آسیا سازی در ایران از صنایع پر رونق به شمار میرفته است. فاصله تاریخی زیادی بین آسیاهای ایرانی و آنچه آسیای اروپایی نامیده میشود وجود دارد آسیاهای اروپایی دارای محور افقی بوده و هنوز هم مورد استفاده واقع میشوند. یکی از اولین کسانی که به تحقیقات علمی بر روی آسیاهای بادی پرداخت اسمیتون انگلیسی بود که با بکارگیری نتایج تحقیقات مکلورن در زمینه آیرودینامیک به محاسباتی در زمینه سرعت باد و پرهها، فشار باد و همچنین زاویه پرهها پرداخت. اسمیتون دریافت که قدرت آسیاها با مکعب سرعت باد متناسب میباشد. [۱]

اولین آسیای بادی جهت تولید الکتریسیته در سال ۱۸۹۰ برای کارهای روستایی و کشاورزی در آمریکا ساخته شد، در همین زمان در دانمارک فردی به نام پروفوسور لاکور (**La Cour**) یک آزمایشگاه تحقیقاتی تاسیس نمود و تا زمان مرگ خود به سال ۱۹۰۷ به تحقیقاتی در این زمینه پرداخت. آسیای او روتوری به قطر ۲۲/۸ متر و پرههایی به عرض ۲/۵ متر داشته و دو دینام به قدرت **۹ kW** را تغذیه مینمود. [۲] امروزه با توجه به پیشرفتهای صورت گرفته در این زمینه انواع و اقسام توربینها در اندازههای از چندین کیلووات تا چند مگاوات ساخته شده و مورد بهره برداری قرار میگیرند. اصولاً توربینها به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می شوند که به ترتیب در اندازههای کمتر از **۲۵ kW**، **۲۵ kW** تا **۱۵۰ kW** و از **۱۵۰ kW** تا بیش از **۲ MW** بصورت متصل یا جدا از شبکه در حال کار میباشد. قطر

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بهینه روتورها بین ۶۰ تا ۱۰۰ متر بوده، توان بهینه آنها نیز بین ۱ تا ۳ مگاوات و طول عمر متوسط توربینها نیز بین ۲۰ تا ۳۰ سال محاسبه شده است. [۲]

جدول ۱-۱: هزینه ویژه احداث مزارع بادی با توجه به توان نامی توربین [۲]

توان نامی (kW)	هزینه ویژه احداث (\$/kW)
کمتر از ۵۰	۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰
۵۰ تا ۱۰۰	۱۷۰۰ تا ۱۰۰۰
۱۰۰ تا ۵۰۰	۱۰۰۰ تا ۷۵۰
۵۰۰ تا ۱۰۰۰	۸۰۰ تا ۶۵۰
۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰	۱۰۰۰ تا ۷۵۰

به لطف تحقیقات فراوان به عمل آمده در زمینه ساخت نیروگاههای بادی هزینه ساخت این نیروگاهها از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ \$/kW در سال ۱۹۸۰ به کمتر از ۵۰۰ \$/kW در آغاز قرن بیست و یکم و هزینه تولید آنها نیز از ۴۰ cent/kWh در سال ۱۹۸۰ به کمتر از ۴ cent/kWh کاهش یافته است. [۲] همچنین برای تعمیر و نگهداری آنها نیز رقمی حدود ۱ cent/kWh در نظر گرفته میشود. [۲]

جدول ۲-۱: روند کاهش هزینههای برق بادی<sup>۱</sup> از ۱۹۸۰ تا بعد از سال ۲۰۰۰ [۳]

سال	۱۹۸۰	۱۹۹۷	بعد از ۲
هزینه تولید	تا ۳۰	۷ تا ۵	کمتر
هزینه سرمایه گذاری (\$/kW)	۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰	۸۰۰ تا ۵۰۰	کمتر از ۵۰۰
عمر بهره برداری (سال)	۷ تا ۵	۲۰	۳۰
ضریب ظرفیت	۱۵٪	۲۵٪ تا ۳۰٪	بیش از ۳۰
دسترسی	۵۰٪ تا ۶۵٪	۹۵٪	بیش از ۹۵٪
رنج اندازه (kW)	۱۵۰ تا ۵۰	۱۰۰۰ تا ۳۰۰	۲۰۰۰ تا ۵۰۰

از جمله دلایل کاهش این هزینهها میتوان به استفاده از کامپوزیتهای مقاوم و ارزان قیمت جهت ساخت توربینهای بزرگ، کاهش قیمت ادوات الکترونیک قدرت، استفاده از ژنراتورهای دور متغیر جهت استفاده از حداکثر توان باد، افزایش ضریب دسترسی این نیروگاهها، اقتصادی تر شدن این نیروگاهها با افزایش اندازه آنها و ... نام برد. [۲]

<sup>۱</sup> برای مناطق با سرعت متوسط ۷ m/sec و ارتفاع برج ۳۰ متر

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

حدود ۷٪ کل انرژی تابشی خورشید به انرژی بادی تبدیل میشود و حداقل سرعت وزش باد برای تولید اقتصادی برق  $5/1 \text{ m/sec}$  و برای کار پمپها و شارژرها حدود  $3 \text{ m/sec}$  میباشد. حدود ۵۰٪ سطح زمین دارای سرعت متوسط سالانه‌ای بین  $4/4$  تا  $5/1 \text{ m/sec}$  بوده و کشور ما نیز از این نظر در سطح متوسطی واقع شده است. ایران پتانسیل نصب  $6500 \text{ MW}$  نیروگاه بادی را دارا بوده که در حال حاضر حدود  $100 \text{ MW}$  از این ظرفیت در دست بهره‌برداری و یا در حال نصب میباشد.

جدول ۱-۳: سرعت باد و چگالی توان باد در نقاط مختلف کشور [۲]

نام شهر	میانگین سرعت باد در دراز مدت (m/sec)	چگالی توان ( $\text{W/m}^2$ )
دزفول	۵/۸	۸۹
رامسر	۲/۸	۱۵
زابل	۶/۱	۱۳۱
زاهدان	۵/۳	۹۱
سبزوار	۵/۶	۱۰۷
سنندج	۶/۷	۳۵
کرمان	۶/۴	۱۶۲
کرمانشاه	۴/۴	۵۷
بندر لنگه	۴/۷	۶۶
بندر عباس	۵	۵۶
تبریز	۵	۷۹
تربت حیدریه	۳/۶	۳۱
تهران (مهرآباد)	۴/۲	۴۲
اهواز	۷/۵	۲۷۱

منطقه منجیل با دارا بودن سرعت متوسط  $5/4 \text{ m/sec}$  و تداوم سرعت بین ۴ تا  $8 \text{ m/sec}$  در حدود ۸۹٪ سال از بهترین مناطق جهت ساخت مزارع بادی در کشور به شمار میرود که کار ساخت نیروگاه بادی در آن از سال ۱۳۷۲ و با خرید دو توربین  $500 \text{ kW}$  از دانمارک، توسط سازمان انرژی اتمی آغاز شده و اکنون بیش از ۲۰ توربین با قدرتهای ۵۰۰، ۵۵۰ و  $300 \text{ kW}$  بطور متصل به شبکه در حال تولید

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

انرژی میباشند. [۱] در آمریکا در سال ۱۹۷۹ یک ماشین  $2\text{ MW}$  بصورت متصل به شبکه به صورت موفقیت آمیزی مورد آزمایش قرار گرفت. ظرفیت نصب شده این کشور در سال ۱۹۹۵،  $1630\text{ MW}$ ، سال ۲۰۰۰،  $3515\text{ MW}$  و در سال ۲۰۰۶،  $6000\text{ MW}$  بوده و پیش بینی میشود تا سال ۲۰۱۵ این میزان به  $12000\text{ MW}$  افزایش پیدا کند. در اروپا نیز ظرفیت نصب شده در سال ۱۹۹۵،  $2000\text{ MW}$ ، سال ۹۷،  $4700\text{ MW}$ ، سال ۲۰۰۰،  $8000\text{ MW}$  بوده و پیش بینیها نشان میدهد که این ظرفیت در سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به ترتیب به  $40000$  و  $100000$  مگاوات بالغ خواهد شد.

جدول ۱-۴: اهداف آینده موسسه انرژی بادی اروپا (EWEA) [۳]

سال	ظرفیت نصب شده	نرخ رشد سالانه
۱۹۹۷	$4425\text{ MW}$	مرجع
۲۰۰۰	$8000\text{ MW}$	۲۱/۸٪
۲۰۱۰	$40000\text{ MW}$	۱۷/۵٪
۲۰۲۰	$100000\text{ MW}$	۱۰٪

لازم به ذکر میباشد که آلمان، آمریکا و دانمارک جزء پیشتازان این صنعت در دنیا میباشند. در آسیا نیز هند با داشتن ظرفیت ۵۶۵ و  $1000\text{ MW}$  ظرفیت نصب شده در سالهای ۹۵ و ۹۷ و دارا بودن پتانسیل تولید  $20000\text{ MW}$  سردمدار استفاده از نیروگاههای بادی میباشد. [۳]

جدول ۱-۵: درصد تامین انرژی الکتریکی از طریق باد [۳]

آینده	۱۹۹۷	
۵۰٪ تا سال ۲۰۳۰	۶٪	دانمارک
۲۰ تا ۲۵٪ تا سال ۲۰۱۰	۱۰٪	آلمان
۱۰٪ تا سال ۲۰۱۰	کمتر از ۱٪	آمریکا
۵ تا ۱۰٪ تا سال ۲۰۱۰	-----	ایرلند

به نظر میرسد که تنها منبع انرژی تجدیدپذیری که میتواند از نظر اقتصادی با انرژیهای فسیلی مقایسه شود انرژی بادی باشد، چراکه انرژی دریافتی آن بصورت مکانیکی بوده و به راحتی و با کمترین تبدیلات و تلفات قابل تبدیل بصورت الکتریکی میباشد. به علاوه از لحاظ زیست محیطی نیز جز پاکترین انواع انرژی بوده و مضاف بر عدم تولید گاز و ذرات معلق در صورت نصب در نزدیکی محل بار به علت عدم نیاز به ساخت خطوط فشار قوی باعث کاهش تشعشعات الکترومغناطیسی نیز میشود.

جدول ۱-۶: هزینه نهایی تولید نیروگاههای مختلف کشور بر حسب ریال به کیلووات ساعت [۲]

نوع نیروگاه	هزینه نهایی	هزینه نهایی با احتساب هزینههای اجتماعی و کنترل آلودگی
بخاری با سوخت نفت کوره	۱۲۲/۷	۲۱۸/۷

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱۲۸/۴	۸۶	بخاری با سوخت گاز
۲۱۴/۸	۱۰۰/۲	بخاری با سوخت زغالسنگ
۸۹/۵	۵۹/۸	سیکل ترکیبی
۱۰۱/۳	۶۱/۱	گازی با سوخت گاز (بار پایه)
۲۶۵/۲	۱۷۴/۴	گازی با سوخت نفت گاز (بار پایه)
۱۳۳/۳	۷۸/۸	گازی با سوخت گاز (بار پیک)
۲۹۵/۶	۱۹۹/۲	گازی با سوخت نفت گاز (بار پیک)
	۵۵۵/۱	آبی یک منظوره
	۴۲/۸	آبی دو منظوره (بخش برق)
	۱۰۷/۵	آبی کوچک
	۲۶۸/۷	هسته‌ای
	۱۸۹۹/۷	خورشیدی فوتوولتائیک
	۵۳۱/۹	خورشیدی سهموی دراز
	۶۶۴/۹	خورشیدی هلیواستاتی
	۱۰۴۴/۸	خورشیدی دیش استرلینگ
	۵۹۰	زمین گرمایی
	۲۵۰/۴	زیست توده
	۱۶۰/۷	بادی

جدول ۱-۷: میزان تولید آلاینده‌های زیست محیطی نیروگاهی در ایران و آمریکا

آمریکا سال ۱۹۹۵ [۳]		ایران سال ۱۳۸۱ [۲]		آلاینده
درصد از کل	میلیون تن	درصد از کل	میلیون تن	
۲۹٪	۶	۱۱٪	۰/۱۲۳	NO <sub>x</sub>
۶۶٪	۱۵	۲۷٪	۰/۳۲۰	SO <sub>2</sub>
۳۶٪	۲۰۰۰	۲۴٪	۸۰	CO <sub>2</sub>

## ۱-۲-۱-۲-۱ ساختار باد

دو مطلب در مورد باد مهم است. یکی نحوه تغییر وزش آن است و دیگری توانی که می‌توان از آن استحصال کرد.

## ۱-۲-۱-۱ انرژی باد

انرژی جنبشی مقداری از هوا به جرم  $m$  کیلوگرم که با سرعت  $u$  متر بر ثانیه در حال حرکت می‌باشد، برابر خواهد بود با:



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$\rho = \rho_0 e^{0.974 \times 10^4 h} \quad ۸-۱$$

$$V = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad ۹-۱$$

لازم بذکر است که  $\alpha$  پارامتری بدون بعد بوده و از آن به عنوان ضریب اصطکاک نام برده میشود. جدول ۸-۱ نشان دهنده بعضی مقادیر  $\alpha$  میباشد.

جدول ۸-۱: برخی مقادیر  $\alpha$  مربوط به رابطه ۹-۱

$\alpha$	نوع زمین
0.10	دریاچه، اقیانوس، زمین هموار و سخت
0.15	علفزار و مرتع
0.20	گیاهان، پرچینها و بوته‌های بلند
0.25	زمینهای پر درخت
0.30	شهرهای کوچک با درخت و بوته
0.40	محیطهای شهری با ساختمانهای بلند

رابطه ۹-۱ نیز پس از خطی‌سازی و کمی تقریب به صورت زیر نیز قابل بیان خواهد بود:

$$\rho = \rho_0 10^4 h \quad ۱۰-۱$$

همچنین در مرجع [۳] نیز رابطه‌ای بصورت زیر برای محاسبه سرعت باد در ارتفاع  $h$  ارائه شده است:

$$v = v_0 \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_0}{z_0}} \quad ۱۱-۱$$

که در عبارت فوق  $z_0$  برابر با ارتفاع ناهمواریهای زمین میباشد. لازم به ذکر است که منحنیهای بدست آمده از روابط ۹-۱ و ۱۱-۱ تقریباً بر یکدیگر منطبق می‌باشند. مثلاً  $z_0 = 10^3$  هم‌ارز با  $\alpha=0.1$  می‌باشد. کاهش سرعت باد در نزدیکی سطح زمین ناشی از اصطکاک بوجود آمده در اثر تماس یا برخورد جریان باد با سطح زمین میباشد و نیز اشاره به این نکته نیز حائز اهمیت بوده که روابط ۹-۱ و ۱۱-۱ تا ارتفاع حدود ۴۵۰ تا ۵۰۰ متری زمین قابل قبول می‌باشند و با عبور از این ارتفاع سرعت باد دوباره کاهش می‌یابد. [۱]

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

اساس تبدیل انرژی توسط توربینهای بادی بر کاهش انرژی جنبشی هوای در حال حرکت استوار است. توان بدست آمده از باد برابر اختلاف توان باد، پیش و پس از عبور از توربین میباشد. لازم به ذکر است که هیچ توربینی حتی در بهترین شرایط نیز نمیتواند تمام انرژی باد را دریافت نماید، چرا که در این صورت باد پس از عبور از میان پره‌های توربین کل انرژی خود را از دست داده و متوقف میگردد. با وجود این با طراحی بهتر میتوان به بازده ایده‌آلی که مقدار آن در ادامه محاسبه خواهد شد رسید.

نخستین کسی که بطور علمی بر روی محاسبه انرژی باد کار کرد، یک آلمانی به نام بتز بود. بتز تئوری خود را پایه اصل برابری نیرو با آهنگ تغییرات اندازه حرکت بنا نهاد. باتوجه به شکل ۱-۱ فرض کنید که به ترتیب سرعت و سطح مقطع باد پیش از برخورد با توربین برابر با  $u_1$  و  $A_1$ ، در فضای بین پره‌ها برابر با  $v$  و  $A$  و پس از عبور از توربین برابر با  $v_2$  و  $A_2$  باشد.

فرض میکنیم که جرم مفروض  $\Delta m$  کیلوگرم از هوا (باد)، در طی زمانی برابر  $\Delta t$  ثانیه از فضای بین پره‌های توربین گذشته و سرعتش از  $u_1$  به  $v_2$  کاهش پیدا کرده‌است. تغییرات انرژی جنبشی برای این مقدار هوا بصورت زیر محاسبه میگردد:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{1}{2} \Delta m (v_1^2 - v_2^2) \quad 12-1$$

در نتیجه توان متوسط تبدیل شده در توربین برابر خواهد بود با نسبت بین تغییرات انرژی جنبشی هوا به زمان این تغییرات. یعنی:

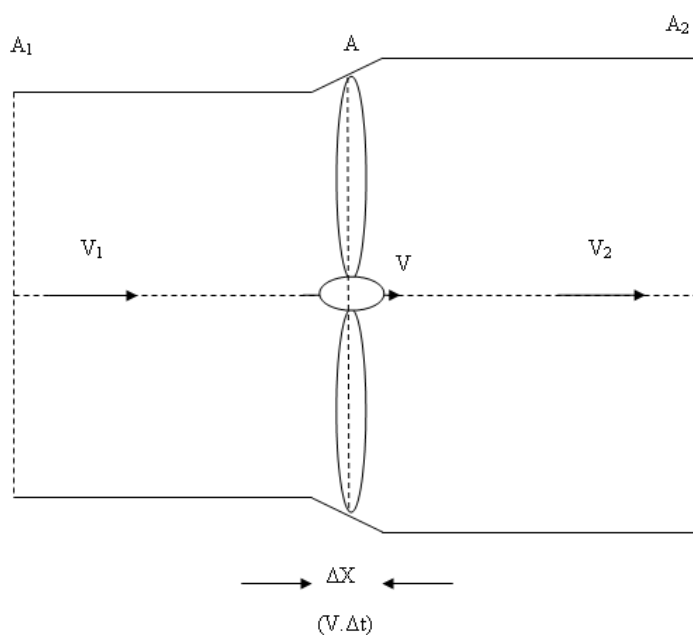
$$\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_1^2 - v_2^2) \quad 13-1$$

با فرض ثابت بودن سرعت باد در تمام فضای بین پره‌ها،  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$  به  $\frac{dm}{dt}$  (رابطه ۱-۳)، و  $\bar{P}$  نیز به  $P$  تبدیل شده و در نتیجه رابطه ۱-۱۳ به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_2^2) \quad 14-1$$



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرمان سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱-

شکل ۱-۱: برخورد ستونی از باد با روتور ایده آل برای ارائه تئوری بتز [۱]

برای بدست آوردن  $v$  بدین شکل عمل میشود. با فرض اینکه توان تبدیل شده در توربین از رابطه زیر قابل محاسبه باشد. و از طرفی اگر نیروی وارد به پره ها برابر با تغییرات اندازه حرکت جرم  $\Delta m$  از هوا قبل و بعد از برخورد با پره ها باشد. آنگاه  $F$  بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$F = \Delta m \left( \frac{\Delta V}{\Delta t} \right) = \rho A v \Delta V \quad 15-1$$

$$F = \Delta m \left( \frac{v_1 - v_2}{\Delta t} \right) = \rho A v (v_1 - v_2) \quad 16-1$$

در نتیجه رابطه ۱۵-۱ به ۱۷-۱ تبدیل میگردد:

$$P = \rho A v^2 (v_1 - v_2) \quad 17-1$$

با برابر هم قرار دادن روابط ۱۴-۱ و ۱۷-۱ و عملیات محاسباتی  $v$  به شکل زیر بدست میاید:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad 18-1$$

اگر نسبت بین سرعت باد قبل و بعد از عبور از پره ها برابر  $r$  در نظر گرفته شود، رابطه نهایی توان

تبدیل شده در توربین به صورت ۱۹-۱ قابل بیان خواهد بود:

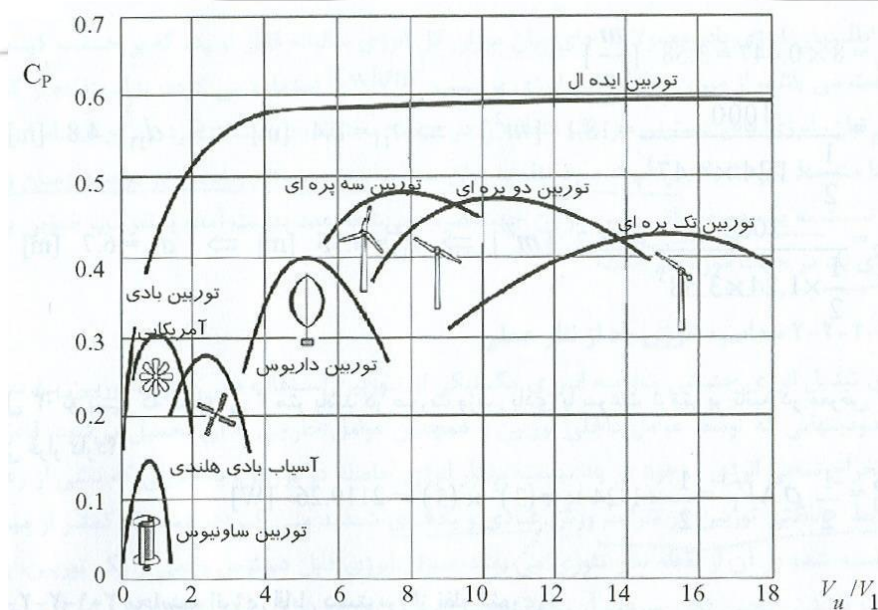
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$P = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1-r^2)(1+r) \quad 19-1$$

اگر نسبت بین توان تبدیل شده در توربین ۱-19، به توان موجود در جریان عبوری باد را به عنوان معیاری جهت سنجش کارایی توربینها در نظر گرفته شود، میتوان پارامتر  $C_P$  را به عنوان راندمان آیرودینامیکی توربین بصورت زیر بیان نمود:

$$C_P = \frac{1}{2} (1-r^2)(1+r) \times 100 \quad 20-1$$

برای محاسبه بیشینه راندمان قابل حصول در توربینهای کفایست که از رابطه ۱-20 بر حسب  $r$  مشتق گرفته و برابر صفر قرار داده شود. در نتیجه این امر دو مقدار  $-1$  و  $1/3$  برای  $r$  بدست می آید که از این میان  $1/3$  گزینه قابل قبول میباشد. در نتیجه راندمان ماکزیمم برای یک توربین ایده آل از نظر تئوری برابر میشود با:  $C_{P(max)} = 59.3\%$  در عمل و در بهترین شرایط ماکزیمم راندمان قابل حصول برای توربینهای پر سرعت دو و سه پره بین  $40\%$  تا  $50\%$  و برای توربینهای کم سرعت بین  $20\%$  تا  $30\%$  خواهد بود. شکل ۱-۲ راندمان برخی از این توربینها را نشان میدهد.



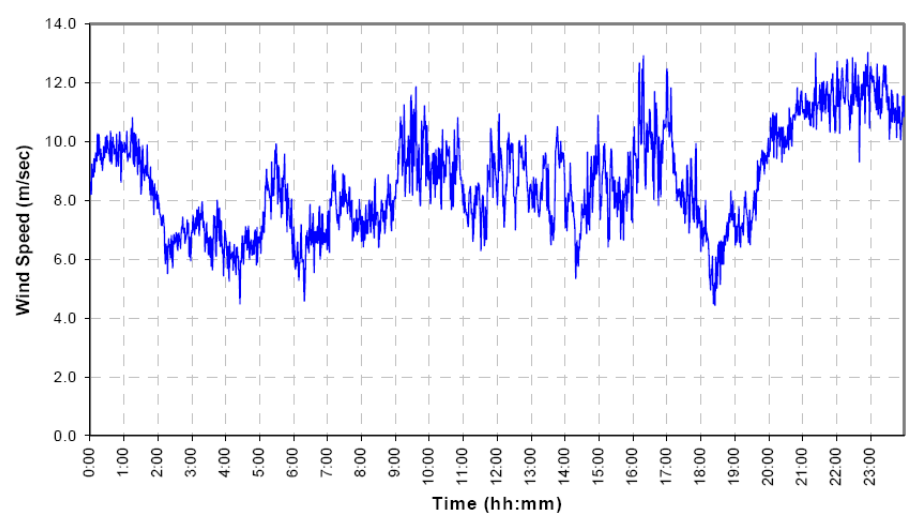
شکل ۲-

شکل ۱-۲: راندمان آیرودینامیکی ( $C_P$ ) بر حسب نسبت میان سرعت نوک پرها ( $V_u$ ) به سرعت باد ( $V_1$ ) [۱]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

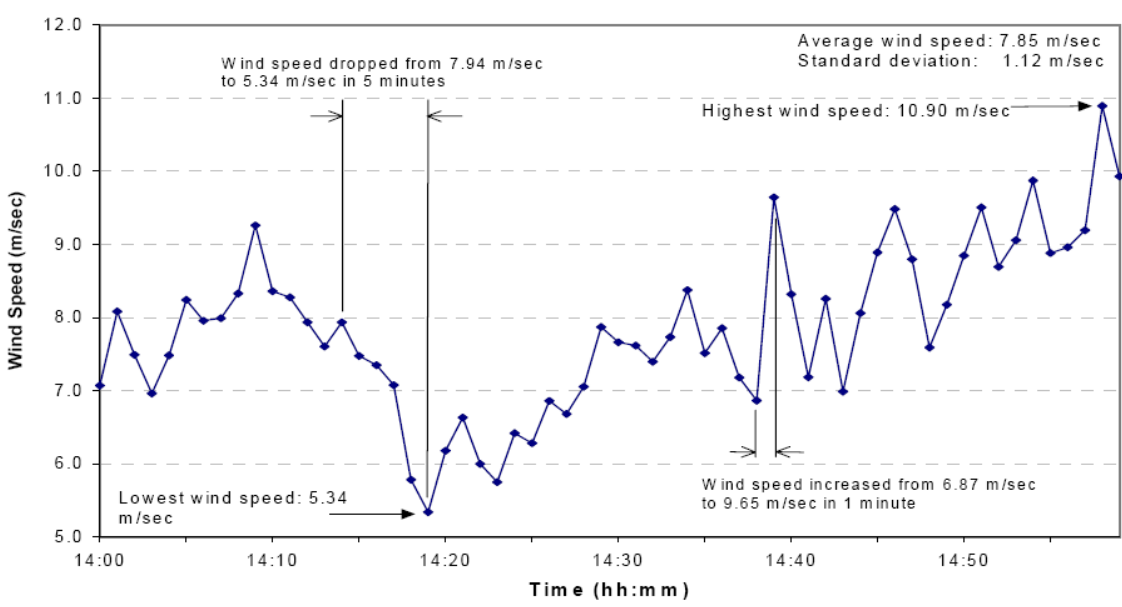
### ۱-۲-۲-۱-۲ وزش باد

سرعت وزش باد یک پدیده کاملاً تصادفی و متغیر است و حداقل در چهار بازه زمانی بلند مدت (سالانه)، میان مدت (روزانه)، کوتاه مدت (هر ساعت) و آنی قابل بررسی است. در شکل های زیر نمونه هایی از این تغییرات آورده شده است.



شکل ۳-

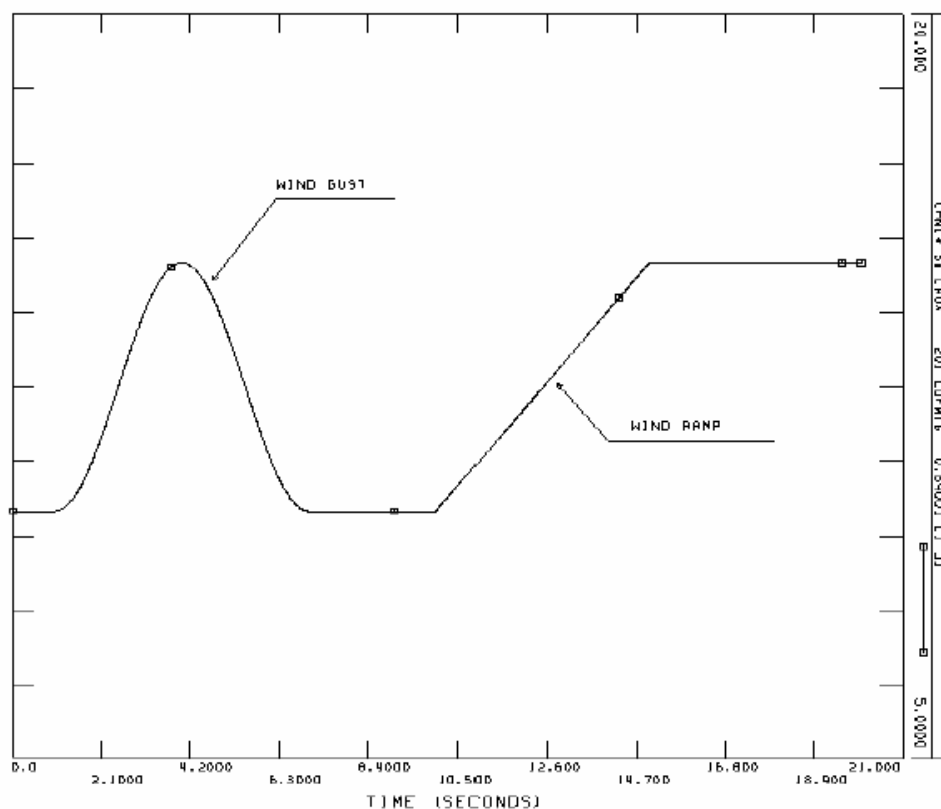
شکل ۳-۱: تغییرات سرعت وزش باد در طول یک روز [۴]



شکل ۴-

شکل ۴-۱: تغییرات سرعت وزش باد در طول یک ساعت [۴]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۵-

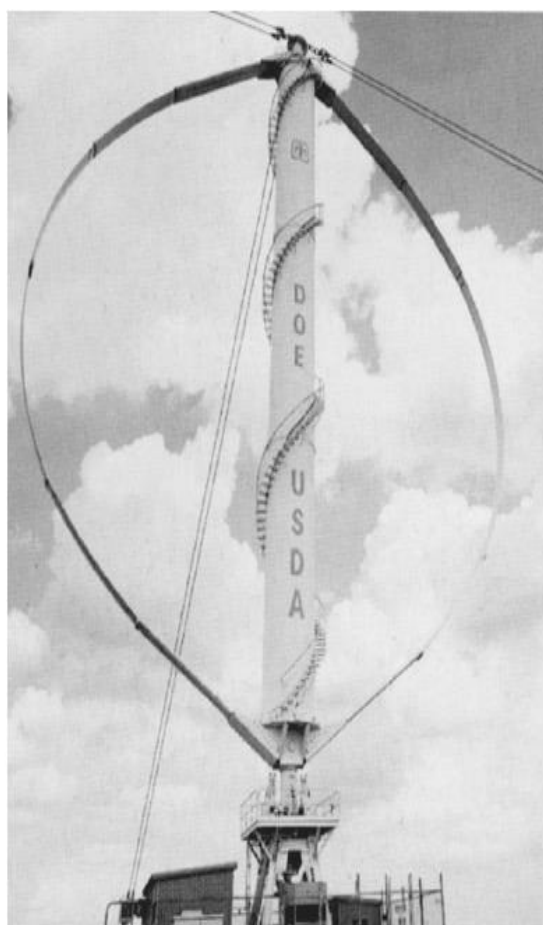
شکل ۱-۵: تغییرات آنی سرعت وزش باد [۵]

### ۱-۳-۳-۱. توربین بادی

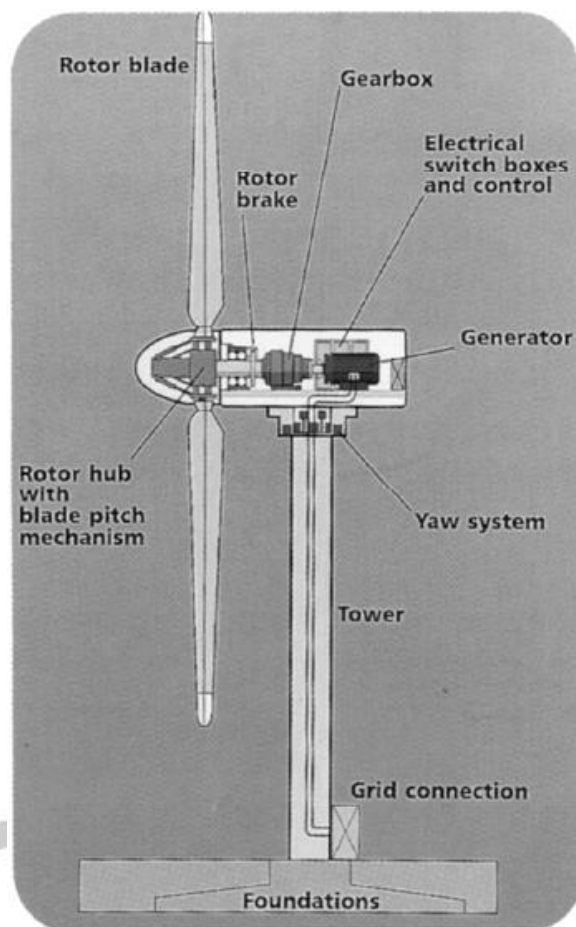
جزئی از نیروگاه بادی که انرژی باد را به انرژی دورانی تبدیل می کند، قسمت توربین است. توربین ها به صورت کلاسیک در دو نوع افقی و عمودی ساخته شده اند که در شکل ۱-۶ و شکل ۱-۷ مشاهده می شود. اما امروزه بیشتر از توربین های افقی در نیروگاه های بادی استفاده می شود. اجزاء این توربین در شکل ۱-۸ به صورت مفصل آمده است. در مورد توربین بادی علاوه بر طول پره ها، زاویه آنها نیز اهمیت ویژه ای دارد که در روابط توربین وارد می شود. زاویه پره<sup>۱</sup> برای حداکثر مقابله با راستای وزش باد، صفر است و با دوران پره به دور محور خودش هر چقدر مقاومت کمتری در مقابل وزش باد داشته باشد افزایش می یابد.

<sup>۱</sup> Pitch Angle

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



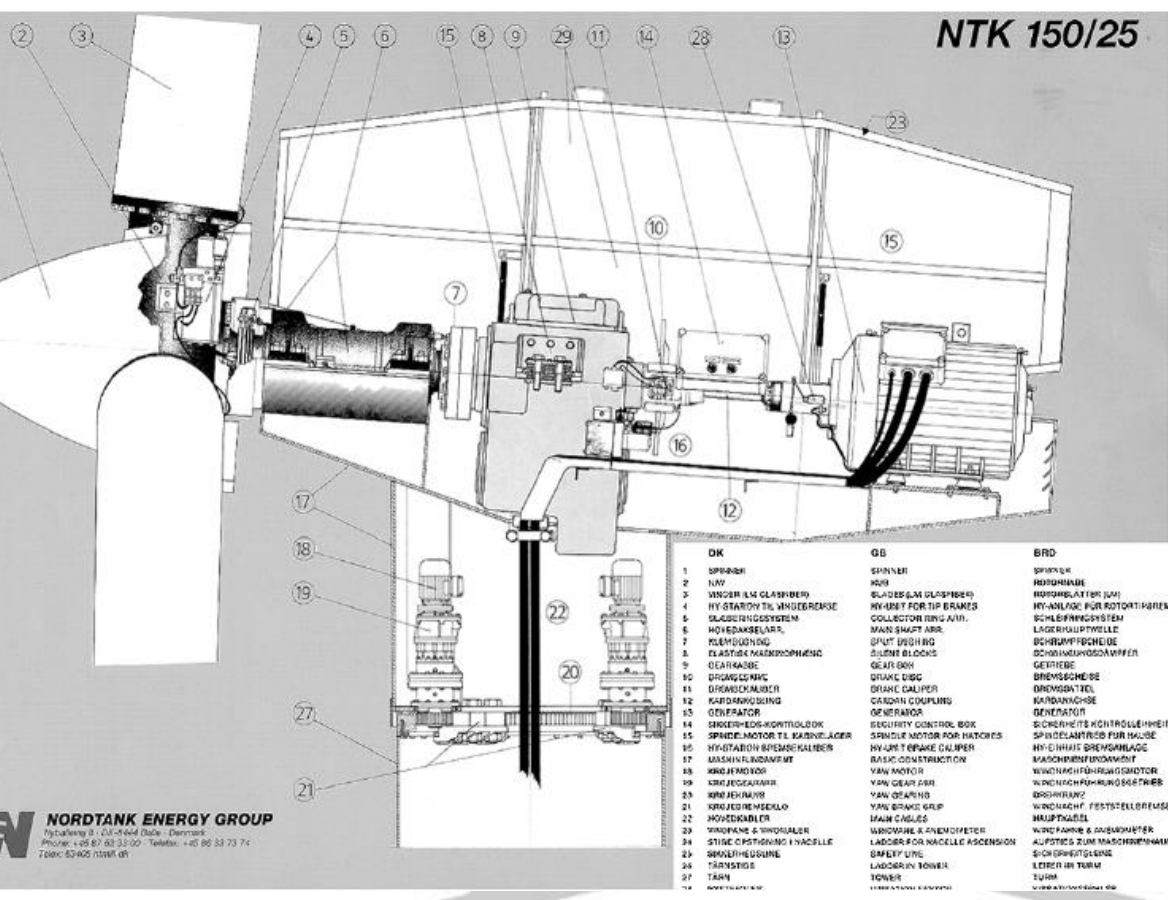
شکل ۱-۷: توربین بادی عمودی



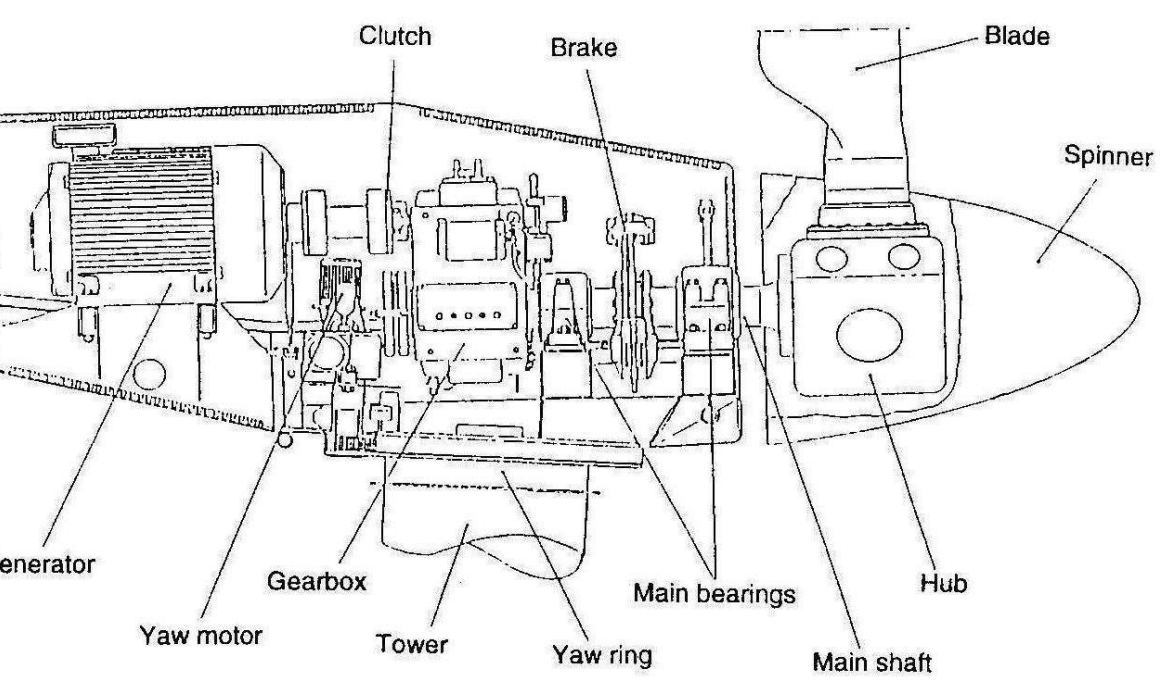
شکل ۱-۶: توربین بادی افقی

WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۶



شکل ۷

شکل ۱-۸: اجزاء توربین بادی افقی [۱] و [۶]

توان قابل دریافت از بادی توسط یک توربین بادی از رابطه ۱-۲۱ بدست می آید. [۷]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$P_W = \frac{\rho}{2} C_P (\lambda, \theta) A_R v_W^3 \quad 21-1$$

$P_W$ : توان قابل جذب از باد [W]

$\rho$ : چگالی جرمی باد [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$ : سرعت وزش باد [m/s]

$A_R$ : سطحی که پروانه های توربین آن را جاروب می کند. [ $\pi D^2/4\text{m}^2$ ]

$C_P$ : ضریب قدرت یا ضریب عملکرد توربین: درصدی از انرژی است که اگر توربین وجود نداشته باشد از آن ناحیه عبور می کرد و حال توسط توربین جذب می شود و از رابطه ۱-۲۲ بدست می آید.

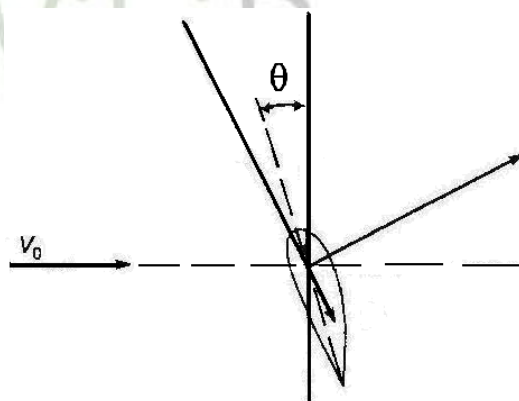
$$C_P (\lambda, \theta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad 22-1$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}$$

در این رابطه  $\theta$  زاویه پره ها (شکل ۱-۹) و  $\lambda$  نسبت سرعت گردش نوک پره ها است که از رابطه

۱-۲۳ بدست می آید. در این رابطه،  $R$  شعاع دوران و  $\omega_r$  سرعت زاویه ای توربین است.

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w} \quad 23-1$$



شکل ۸-

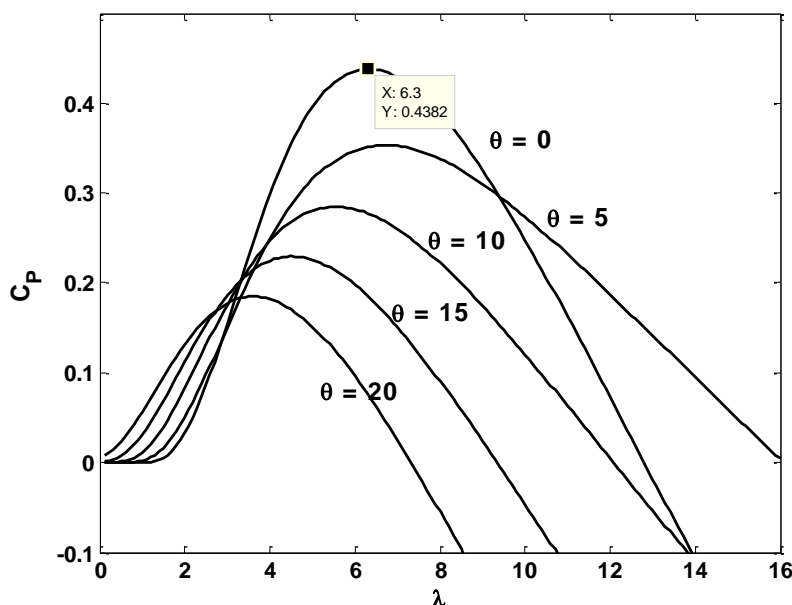
شکل ۱-۹: زاویه پره توربین ( $\theta$ ) [۶]

اگر در یک سرعت وزش ثابت بخواهیم بیشترین توان را جذب کنیم باید سرعت دورانی را انتخاب

کنیم که به ازاء آن  $C_P$  بیشینه شود. منحنی تغییرات  $C_P$  بر حسب  $\lambda$  و  $\theta$  مطابق شکل ۱-۱۰ می باشد.

<sup>1</sup> Tip Speed Ratio

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۹-

شکل ۱-۱۰: نمودار  $C_p$  بر حسب تغییرات  $\lambda$  برای چند مقدار  $\theta$

شکل ۱-۱۰ از برنامه ساده زیر بدست آمده است.  $(mC_p)$  این برنامه علاوه بر رسم  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  مقداری از  $\lambda$  را که به ازاء آن  $C_p$  بیشینه می شود بدست می دهد. مقدار بیشینه برای زاویه  $\theta = 0$  برابر است با:  $C_{pmax} = 0.4382$  و  $\lambda_{max} = 6.3$ . قدم بعدی رسم نمودار تغییرات توان قابل جذب توسط یک توربین بادی مشخص از باد با سرعت های مختلف، بر حسب تغییرات سرعت دوران محور توربین است. از روی این نمودار می توان نمودار گشتاور اعمالی به توربین را نیز بر حسب سرعت توربین برای سرعت های مختلف باد بدست آورد که برای انتخاب ژنراتور ضروری است. مقادیر پایه، از روی سرعت باد پایه محاسبه می شود. اگر سرعت باد پایه  $V_{Wbase}$  باشد داریم:

$$P_{Wbase} = C_{Pmax} V_{Wbase}^3 \left( \frac{\rho}{2} \pi R^2 \right) \quad ۲۴-۱$$

$$\omega_{rbase} = \lambda_{max} V_{Wbase} \quad ۲۵-۱$$

و مقادیر  $\lambda_{max}$  و  $C_{Pmax}$  برابر است با:

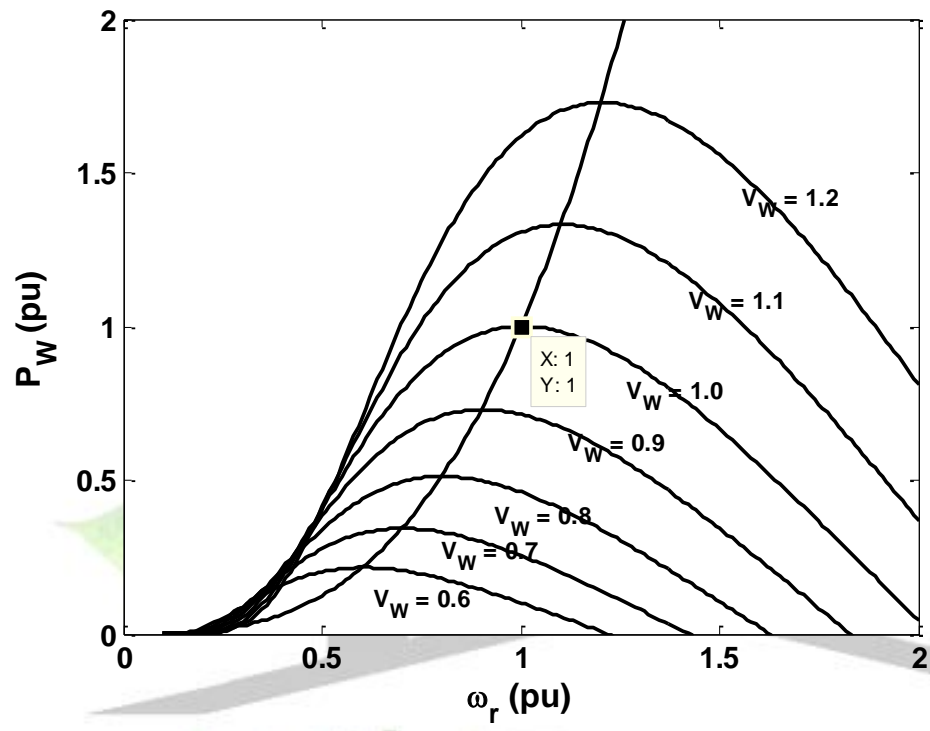
$$\begin{aligned} \lambda_{max} &= 6.3 \\ C_{Pmax} &= 0.4382 \end{aligned} \quad ۲۶-۱$$



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با مشخص شدن مقادیر پایه و داشتن روابط ۱- 21 تا ۱- 26 نمودارهای تغییرات توان و گشتاور توربین برحسب تغییرات سرعت توربین، برای سرعت های مختلف باد قابل رسم است. ( $\theta=0$ )

**(mPw,mTw)**



شکل ۱۰-

شکل ۱۱- ۱: نمودار Pw بر حسب تغییر سرعت توربین برای سرعت های مختلف باد

منحنی که نقاط بیشینه را به هم وصل کرده است از محاسبات زیر بدست می آید:

$$Y = P_{W \max} (pu) = C_{P \max} V_w^3 \left( \frac{\rho A}{2} \right)$$

$$X = \frac{\lambda_{\max}}{R} V_w \Rightarrow V_w = \frac{R}{\lambda_{\max}} X$$

۲۷-۱

$$\Rightarrow Y = C_{P \max} \left( \frac{R}{\lambda_{\max}} \right)^3 \left( \frac{\rho A}{2} \right) X^3$$

$$\Rightarrow Y (pu) = \frac{Y}{P_{W \text{base}}}$$

از شکل ۱۱- ۱ نتیجه می شود که یک توربین بادی حداقل در سه ناحیه باد جداگانه بررسی شود. اول ناحیه سرعت های بسیار پایین باد است که بعلت پایین بودن توان قابل جذب در مقابل هزینه ها و استهلاک سیستم توربین فعال نخواهد بود. در ناحیه دوم توربین روی منحنی حداکثر توان عمل می کند تا توان به میزان نامی می رسد. اگر سرعت باد از این سرعت بیشتر شود توان بیشتری جذب نمی شود.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

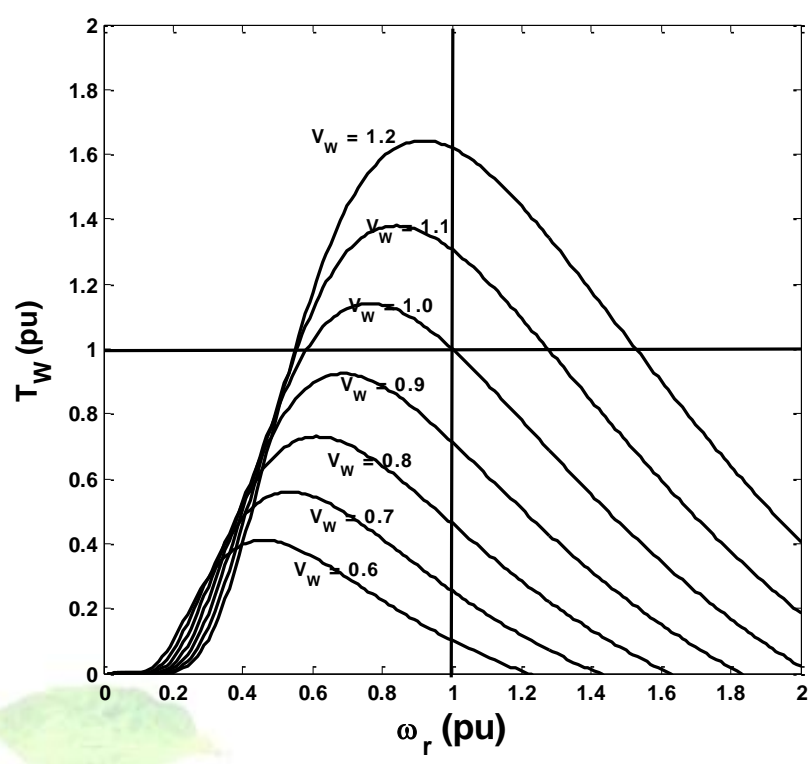
حال سناریوهای مختلفی قابل پیگیری است. اول آنکه سرعت توربین به گونه ای افزایش یابد که توان ثابت بماند. دوم آنکه سرعت توربین به گونه ای کاهش یابد که توان ثابت بماند. سوم اینکه سرعت توربین ثابت بماند و زاویه پره ها تغییر کند. البته تغییر همزمان زاویه پره ها و سرعت توربین نیز قابل فرض است.

افزایش سرعت گزینه مناسبی نیست. به علت اینکه سرعت بالا برای قطعات مکانیکی مناسب نیست و امکان دارد روی منحنی های عملکردی ژنراتور نیز محدود باشد. اگر سرعت توربین کاهش یابد نیز با افزایش گشتاور همراه است (شکل ۱-۱۲) که فشار بیشتری را به مجموعه وارد می کند. پس بهتر آن است که تنها زاویه پره ها افزایش پیدا کند. در این حالت نقطه کار ژنراتور ثابت می ماند. علاوه بر این گشتاوری که باد به پره های توربین وارد می کند نیز ثابت می ماند. [۱]

در شکل ۱-۱۲ مشاهده می شود که برای یک سرعت باد مشخص، گشتاور در سرعت بهینه ی دوران توربین، که بیشینه توان را بدست می دهد، مقدار بیشینه گشتاور برای آن سرعت باد نیست و میزان آن همواره کمتر از حداکثر گشتاوری است که می توان از آن سرعت باد بدست آورد. اگر سرعت باد از سرعت پایه بیشتر باشد و برای کنترل توان ثابت از سناریوی تغییر زاویه پره ها استفاده کنیم نقطه کار توان- سرعت - گشتاور روی همان نقطه کار مبنا ثابت می ماند. البته از آنجا که سرعت پاسخ دینامیکی زاویه پره ها پایین است شاید لازم باشد هنگام تغییر سرعت های شدید باد از سناریوهای دیگر نیز که مبتنی بر تغییر سرعت توربین است نیز استفاده کرد. اگر سرعت توربین افزایش یابد و توان ثابت مانده باشد، گشتاور کاهش می یابد و اگر سرعت توربین کاهش یابد عکس این حالت رخ می دهد. [۸]

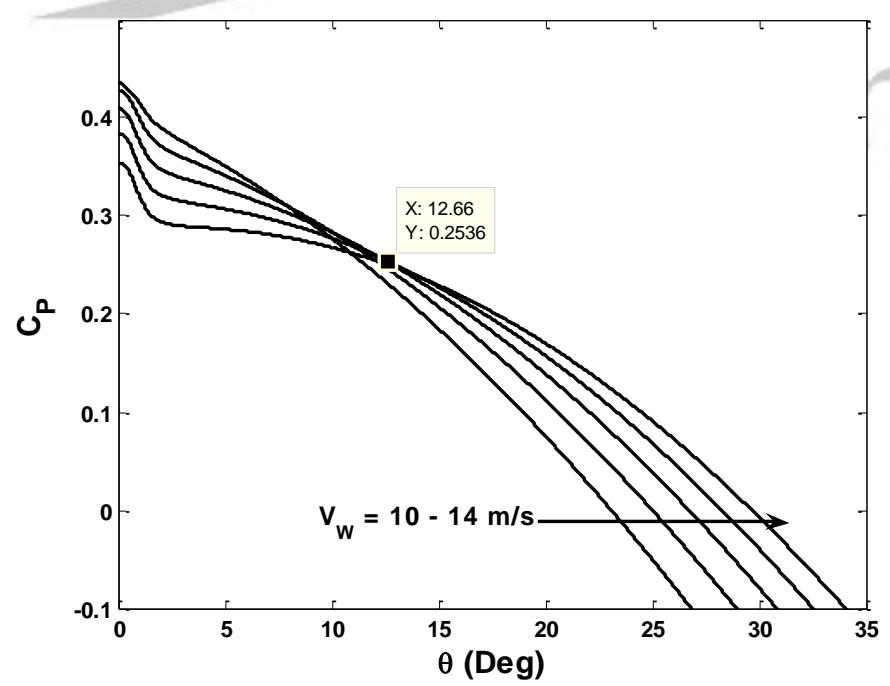
در این مورد در بخش ۱-۴ به صورت مفصل بحث خواهد شد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱۱-

شکل ۱-۱۲: نمودار Tw بر حسب تغییر سرعت توربین برای سرعت های مختلف باد



شکل ۱۲-

شکل ۱-۱۳: Cp بر حسب زاویه پره ها برای سرعت های مختلف باد در سرعت نامی توربین (VWbase = 10)

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در شکل ۱-۱۳ دیده می شود که برای هر سرعت باد، در سرعت نامی و توان نامی می توان زاویه پره توربین مناسب برای آن را محاسبه کرد. برای این منظور از روابط زیر استفاده می شود:

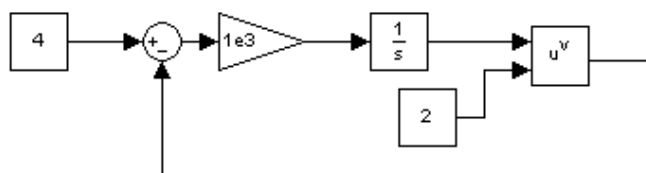
$$P = P_{base} \Rightarrow C_P = \left( \frac{V_{Wbase}}{V_W} \right)^3 C_{Pmax} \quad ۲۸-۱$$

$$\lambda = \frac{R \omega_{rbase}}{V_W}$$

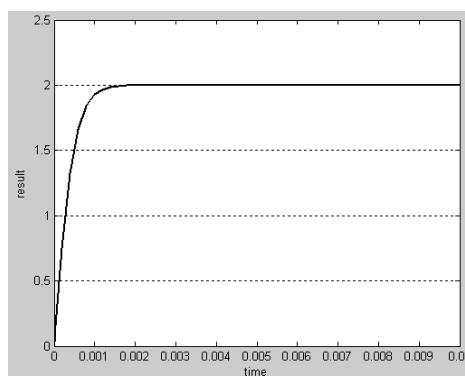
با معلوم شدن  $C_P$  و  $\lambda$  می توان  $\theta$  را بدست آورد. برای حل این معادله از روش حل مدار فیدبک<sup>۱</sup> استفاده شده است که در مدل **MATLAB** با نام **WT** آمده است. البته این مدل برای سرعت های وزش باد پایین تر از سرعت نامی نیز مقدار مطلوب سرعت دوران توربین را بدست می دهد. نتایج این مدل در شکل ۱-۱۴ آمده است.

در شکل ۱-۱۳ و شکل ۱-۱۴ یک نقطه کار یکسان مشخص شده است. برای توربینی با شعاع توربین  $R = 50 \text{ m}$  و  $V_{Wbase} = 10 \text{ m/s}$ ، سرعت باد  $12 \text{ m/s}$  در نظر گرفته شده است. در این حالت

<sup>۱</sup> روش حل عددی است که در آن مقدار مجهول توسط یک مدار کنترل فیدبک بدست می آید. در این روش مقدار معلوم به عنوان مقدار مرجع در نظر گرفته می شود و مقدار مجهول پارامتر تنظیم شونده توسط کنترل کننده انتگرال گیر. مدار آنقدر تغییر می کند تا خروجی کنترل کننده طوری تنظیم شود که خروجی مدار (تابع) با مقدار مرجع برابر شود و خطا صفر شود. این خروجی کنترل کننده انتگرالی همان مقدار مجهول است. مثلاً برای حل معادله  $y = x^2 = 4$  می توان از مدل زیر استفاده کرد (FPS):



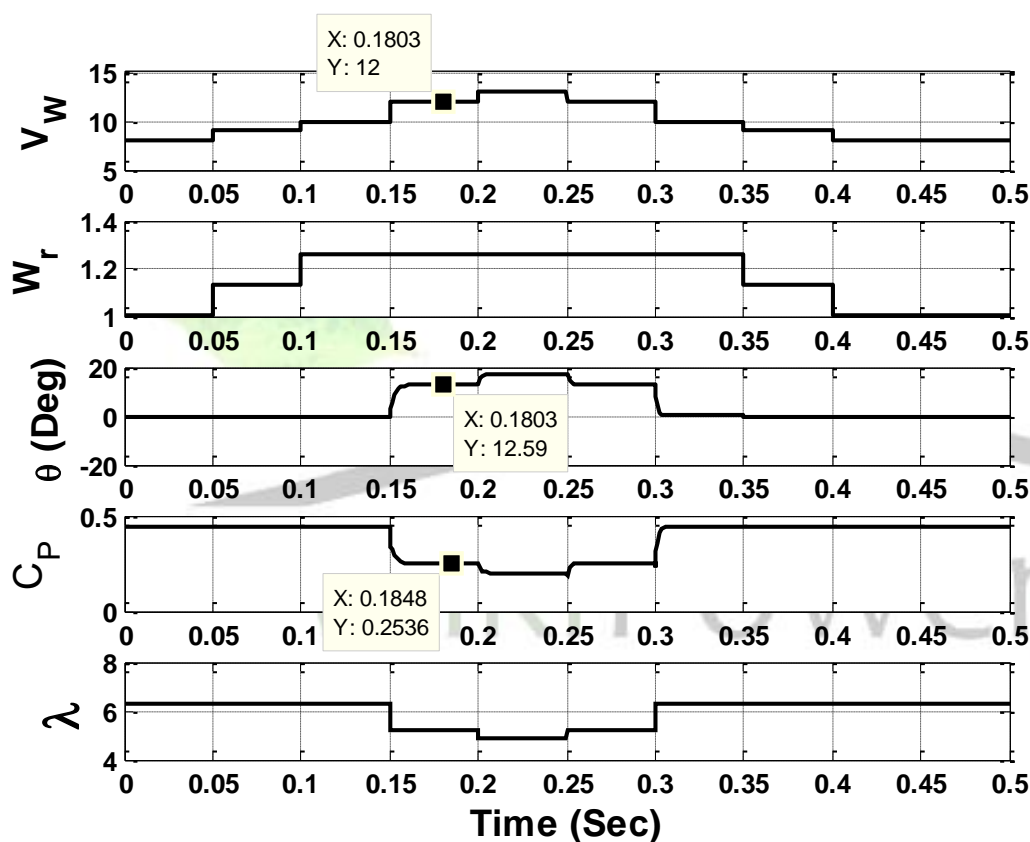
که جواب به صورت زیر خواهد بود (fFPS):



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مطابق سناریو نقطه کار ثابت، زاویه پره ها و ضریب جذب توان معادل از هر دو دو نمودار مقدار یکسان است. ( $C_P = 0.2536$ ,  $\theta = 12.6$ ) نحوه عمل روی شکل ۱-۱۳ به این صورت است که ابتدا برای سرعت باد بالاتر از سرعت باد نامی ضریب جذب توان مناسب از رابطه ۱-۲۸ بدست می آید (رابطه ۱-۲۹) سپس از روی شکل ۱-۱۳ زاویه پره متناظر با آن مشخص می شود.

$$C_P = \left( \frac{V_{Wbase}}{V_W} \right)^3 C_{Pmax} = \left( \frac{10}{12} \right)^3 \times 0.4382 = 0.2536 \quad ۲۹-۱$$



شکل ۱۳-

شکل ۱-۱۴:  $C_P$  و  $\theta$  برای سرعت های مختلف باد در سرعت و توان نامی توربین ( $V_{Wbase} = 10$ )

## ۱-۴-۱ کنترل توربین بادی [۸]

نیاز به کنترل توربین های بادی ناشی از مشخصه های این دستگاه و ماهیت وزش باد است. مهمترین هدف کنترل، مربوط به محدودیتهای توان و سرعت تحت شرایط و مقادیر خاص وزش باد است تا از عملکرد نامطمئن جلوگیری شود. توربین های باد پیشین بدین منظور از روش های مکانیکی استفاده می کردند؛ اما با افزایش سطح توان و ابعاد توربین ها روش های کنترل نیز توسعه یافته است. روش های

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

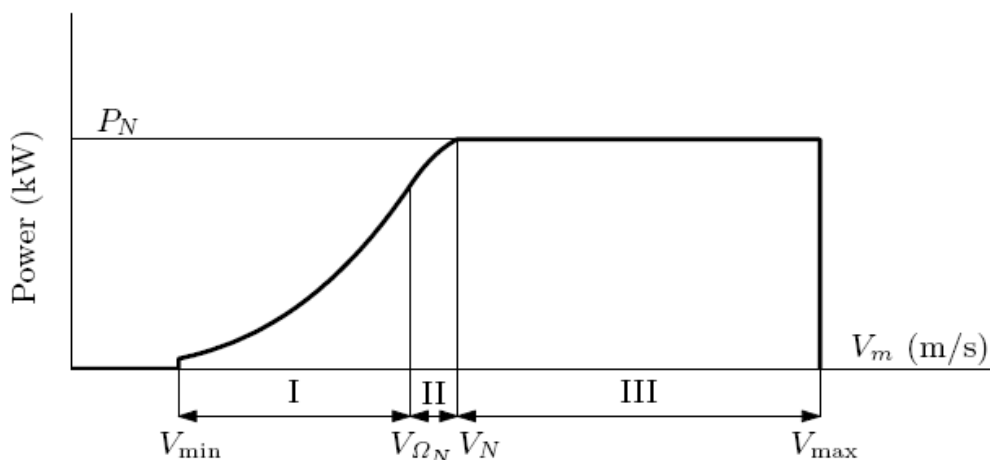
جدیدی که امروزه مورد استفاده قرار می گیرد علاوه بر حفظ توربین در شرایط ایمن کاری، سعی دارند بازده و کیفیت توان جذب شده را نیز بهینه کنند.

طراحی و پیاده سازی یک سیستم کنترل مراحل مختلفی دارد. ابتدا باید اهداف مشخص شود. سپس باید استراتژی هایی که این اهداف را تأمین می کند انتخاب گردد یعنی مشخص شود برای هر سرعت باد، توربین باید چه سرعتی داشته باشد. قدم سوم آن است که این استراتژی پیاده سازی شود. در این قسمت دو قدم اول مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۱-۴-۱-۱-۱-۴-۱ اهداف کنترل

توربین های باد، وسایل ویژه ای هستند برای جذب درصدی از انرژی باد و تبدیل آن به کار مفید. در حالت معمول و کاربرد بیشتر هدف تولید توان الکتریکی و تحویل آن به شبکه قدرت است. در این موارد هزینه توان باید کمینه گردد در حالی که استانداردهای مربوط به آلودگی صوتی و کیفیت توان باید رعایت شود.

اهداف متعددی برای یک توربین باد باید مدنظر قرار بگیرد که همزمان بودن آنها اهمیت بالایی دارد مانند: جذب بیشینه توان، جلوگیری از ایجاد و اعمال بارهای مکانیکی مخرب و کیفیت توان مطلوب. برای یک توربین باد ظرفیت تولید مشخص می کند که چه میزان توان با توجه به ضروریات فیزیکی و اقتصادی از یاد قابل جذب است. این ظرفیت غالباً یا منحنی هایی که توان را بر حسب سرعت باد نشان می دهد مشخص می شود.

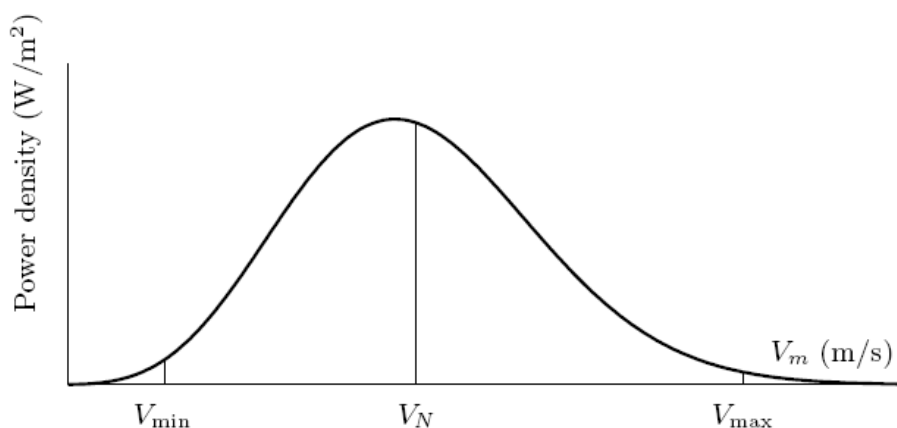


شکل ۱۴-

شکل ۱-۱۵: منحنی ایده آل توان توربین باد

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۱-۱۵ منحنی ایده آل جذب توان توسط یک توربین باد نمونه است. دیده می شود که منحنی توسط دو حد سرعت قطع پایین و قطع بالا محدود شده است. در سرعت های باد پایین تر از سرعت قطع پایین، انرژی حداکثری باد کمتر از حدی است که اقتصادی باشد و تلفات را نیز جبران کند. در بالاتر از سرعت قطع بالا نیز امکان خروج از محدوده توانی ایمن وجود دارد. طراحی توربینی که بتواند این حد توانهای بالا را جذب کند در بسیاری موارد علاوه بر مشکلات فیزیکی، توجیه اقتصادی نیز ندارد. علت اصلی نیز پایین بودن زمان مفید وزش بادهایی با این سرعت و حجم توان است. بدین معنی که اگر هم بتوان توربینی برای جذب این بادهای طراحی کرد، در غالب اوقات از این ظرفیت استفاده نمی شود، یعنی سرمایه گذاری بدون بهره برداری که اقتصادی نیست. (شکل ۱-۱۶)



شکل ۱۵-

شکل ۱-۱۶: چگالی توان باد بر حسب سرعت وزش

### ۱-۴-۲-۱-۴-۲. حالت های کارکردی

نوع خاصی از طراحی پره های توربین وجود دارد که **stall** نامیده می شود و منحنی عملکردی خاصی متفاوت از طراحی معمول دارد. اگر این نوع خاص را کنار بگذاریم، توربین های معمول با توجه به امکان دورمتغی بودن و تغییر زاویه پره به ۴ دسته و حالت عملکردی قابل تقسیم هستند:

۱. سرعت ثابت، زاویه پره های ثابت (FS-FP)
۲. سرعت ثابت، زاویه پره های متغیر (FS-VP)
۳. سرعت متغیر، زاویه پره های ثابت (VS-FP)
۴. سرعت متغیر، زاویه پره های متغیر (VS-VP)

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در قسمتهای قبل اثر تغییرات سرعت را به هنگام ثابت بودن زاویه پره‌ها و بلعکس روی میزان توان قابل جذب بررسی کردیم. (شکل ۱-۱۰ و شکل ۱-۱۱) در اینجا تنها استراتژی کنترل را بر اساس معمول‌ترین نوع توربین بادی که هم سرعت متغیر دارد و هم امکان تغییر زاویه پره‌ها وجود دارد بررسی می‌کنیم.

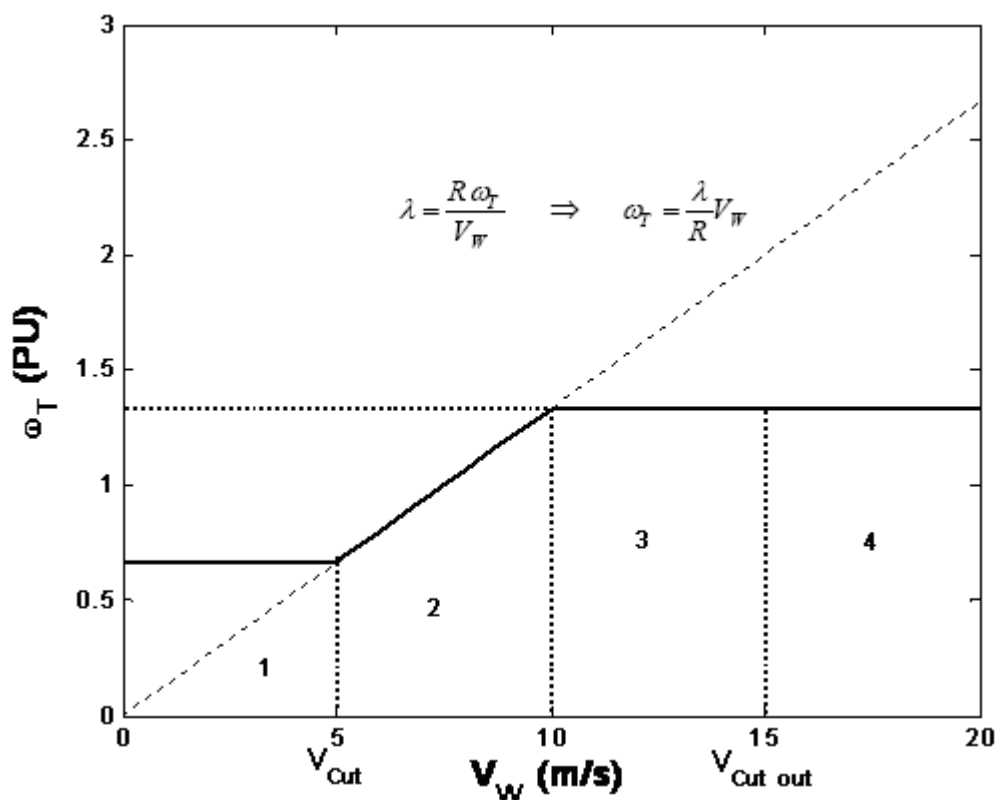
### ۱-۴-۳-۱-۳-۴-۱. استراتژی کنترل توربین باد VS-VP

این استراتژی کنترل روزبه‌روز بیشتر در توربین‌های تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این استراتژی برنامه‌ریزی می‌شود تا توربین در پایین‌تر از سرعت نامی با سرعت متغیر و زاویه پره‌های ثابت عمل کند و در بالاتر از سرعت نامی سرعت توربین در سرعت نامی ثابت باشد و زاویه پره‌ها به گونه‌ای تغییر کند تا توان قابل جذب ثابت بماند.

متغیر بودن سرعت توربین در سرعت‌های پایین باد باعث افزایش و بیشینه شدن توان قابل جذب می‌شود. همچنین متغیر بودن زاویه پره‌ها امکان تنظیم بهینه توان در سرعت‌های بالای باد را می‌دهد. باید توجه داشت که این استراتژی کنترل، منحنی ایده‌آل (شکل ۱-۱۵) را برآورده می‌کند. این توربین قابلیت مهم دیگری نیز در مقابل VS-FP دارد و آن کم کردن بارهای گذراست. این توانایی به خصوص در مورد توربین‌های با ابعاد بسیار بزرگ مهم است.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



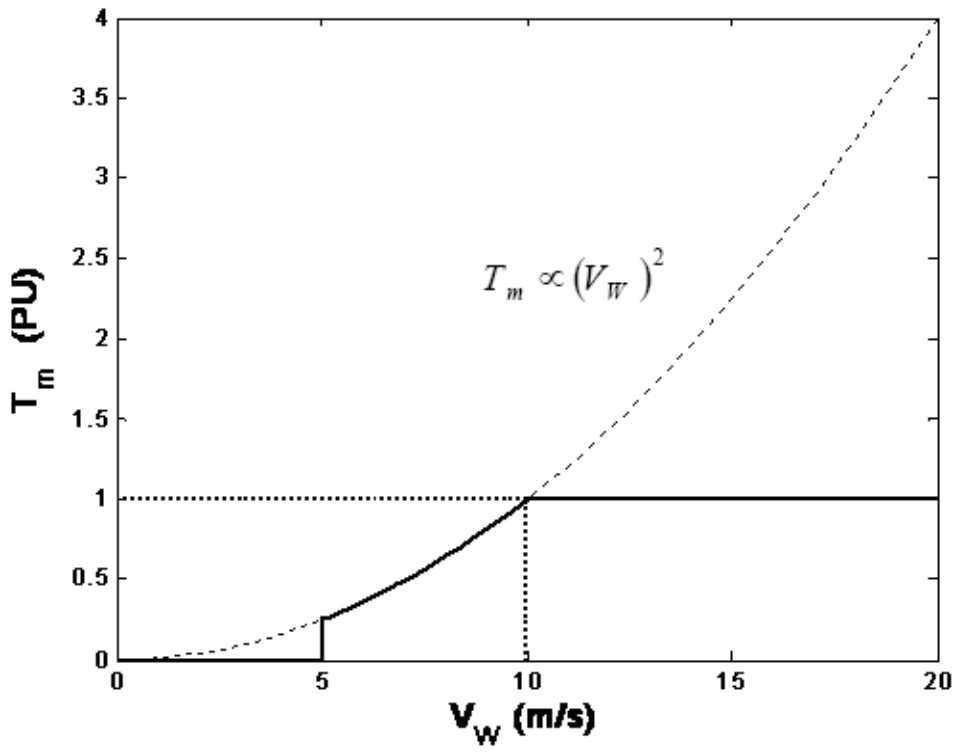
شکل ۱۶-

شکل ۱-۱۷: منحنی عملکردی سرعت توربین برای VS-VP

منحنی عملکردی سرعت در این استراتژی به صورت شکل ۱-۱۷ می باشد. ناحیه ۲ و ۳ مشخص هستند. در ناحیه ۲ روی منحنی حداکثر توان عمل می شود و در ناحیه ۳، توان-سرعت ثابت. در ناحیه ۲، زاویه پرها صفر است ولی در ناحیه ۳ به گونه ای تغییر می کند که با ثابت ماندن سرعت توربین و تغییر سرعت باد، توان قابل جذب توسط توربین ثابت بماند.

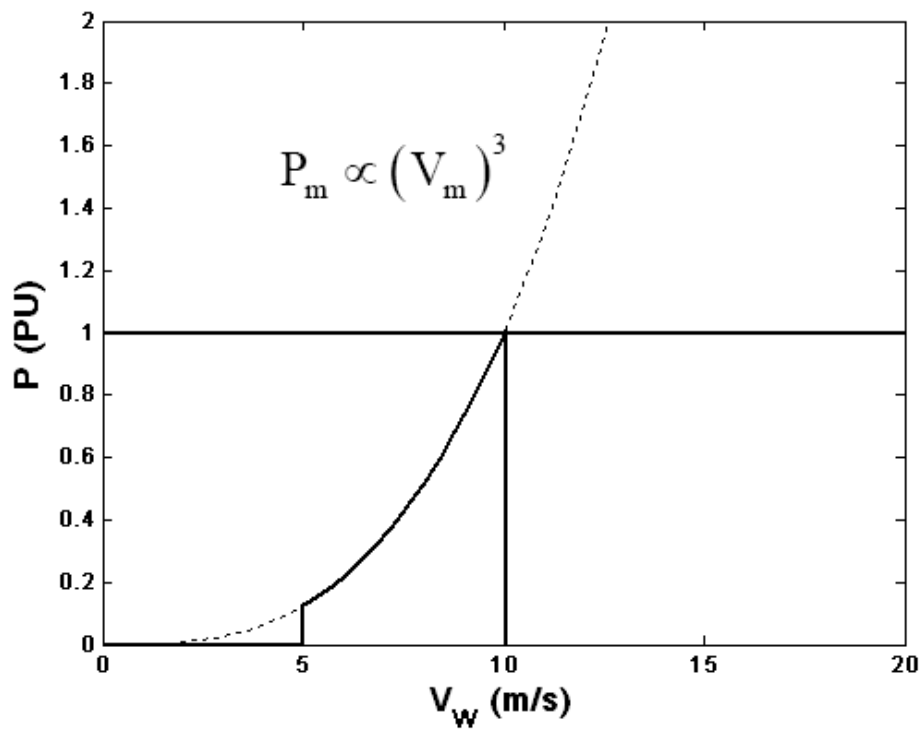
در ناحیه ۱، برخی پیشنهاد کرده اند که سرعت صفر شود ولی اگر افت سرعت وزش باد لحظه ای باشد، با توجه به مشکل بودن و خاص بودن راه اندازی ماشین های القایی بهتر است برای مدتی در همان سرعت حداقل بدون بار دوران کند. گشتاور صفر با تغییر زاویه پرها قابل دستیابی است. ماشین القایی تغذیه دوگانه نیز این امکان را دارد تا در هر سرعتی گشتاور صفر داشته باشد. پس منحنی عملکردی گشتاور نیز به صورت شکل ۱-۱۸ بدست خواهد آمد. منحنی عملکرد توان نیز مطابق شکل ۱-۱۹ است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱۷-

شکل ۱-۱۸: منحنی عملکردی گشتاور توربین برای VS-VP



شکل ۱۸-

شکل ۱-۱۹: منحنی عملکردی توان توربین برای VS-VP

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

باید توجه داشت که چون سرعت سنکرون سرعت مبنا در نظر گرفته شده است، سرعت نامی توپین در مبنای واحد، ۱ نخواهد بود. مثلاً اگر داشته باشیم  $2R=75$  و  $V_{wn}=10 \text{ m/s}$  خواهیم داشت:

$$\omega_{TN} = \frac{\lambda_{\max}}{R} V_w = \frac{6.3}{75} \times 10 = 1.68 \text{ rad/s} = 16 \text{ rpm} \quad ۳۰-۱$$

و اگر نسبت تبدیل جعبه‌دنده را ۱ به ۱۰۰ در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\omega_{mN} = 100\omega_{TN} = 1600 \text{ rpm} \quad ۳۱-۱$$

حال اگر ماشین القایی  $60 \text{ Hz}$  و ۶ قطب باشد داریم:

$$\omega_{syn} = \frac{120f_s}{P} = 1200 \text{ rpm} \quad ۳۲-۱$$

پس اگر سرعت سنکرون را سرعت مبنا بگیریم، سرعت نامی توربین برابر  $\frac{4}{3} PU$  خواهد بود.

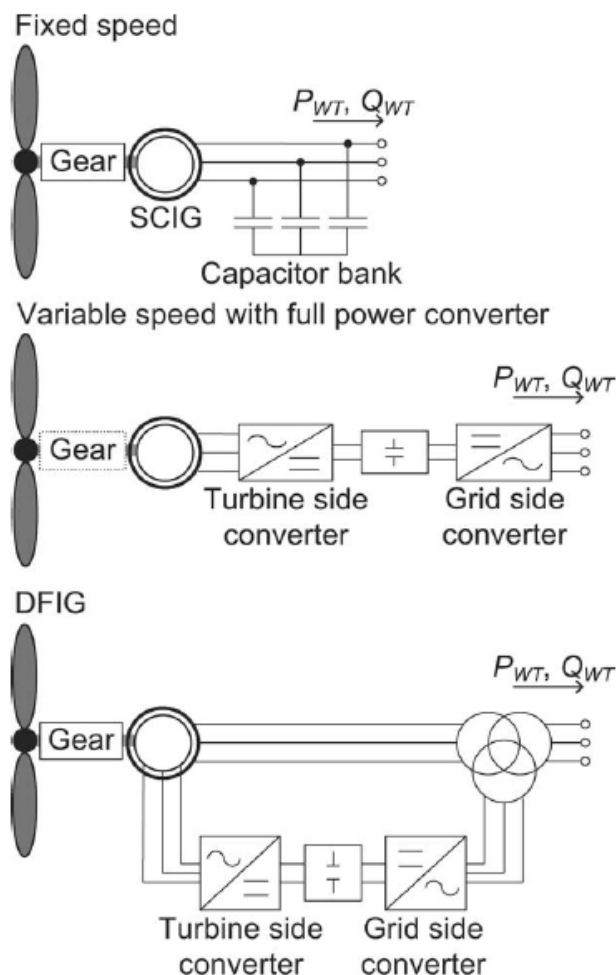
## ۵-۱-۵- ژنراتورهای بادی [۸]

ماشین‌های الکتریکی القایی بیشترین استفاده را در صنعت تبدیل انرژی باد به الکتریسیته دارند. البته در مواردی از ماشین‌های سنکرون استفاده می‌شود، که خصوصاً در شبکه‌های مستقل. علاوه بر این امروزه با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت، عملکرد ماشین‌های القایی بسیار توسعه یافته است. سرعت رفتار دینامیکی ادوات الکترونیک قدرت و قسمت‌های الکتریکی بسیار سریعتر از قسمت‌های مکانیکی است، به همین خاطر در تحلیل‌های دینامیکی سیستم الکتریکی - مکانیکی، می‌توان قسمت‌های مبدل الکترونیک قدرت را در حالت استاتیک مدل کرد.

بر اساس ساختار الکتریکی، ژنراتورهای القایی متصل به توربین‌های بادی به سه نوع تقسیم می‌شوند. (شکل ۱-۲۰) اولین مورد در شکل ۱-۲۰ ساده‌ترین شکل اتصال ماشین القایی به توربین بادی نشان داده شده است که در آن یک ماشین القایی با رتور قفسی مستقیماً به شبکه قدرت متصل است. در شکل دوم، ماشین القایی قفسی در سمت استاتور به طور کامل با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه وصل است. در این نوع اتصال، از انواع ماشین‌های سنکرون معمولی و آهن‌رای دائم نیز می‌توان استفاده کرد. اما در شکل آخر، یک ماشین القایی تغذیه دوگانه نشان داده شده است که استاتور آن

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مستقیماً به شبکه متصل است، ولی تغذیه رتور آن با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت به شبکه وصل می شود.



شکل ۱۹-

شکل ۱- ۲۰: تکنولوژی های ژنراتورهای بادی [۹]

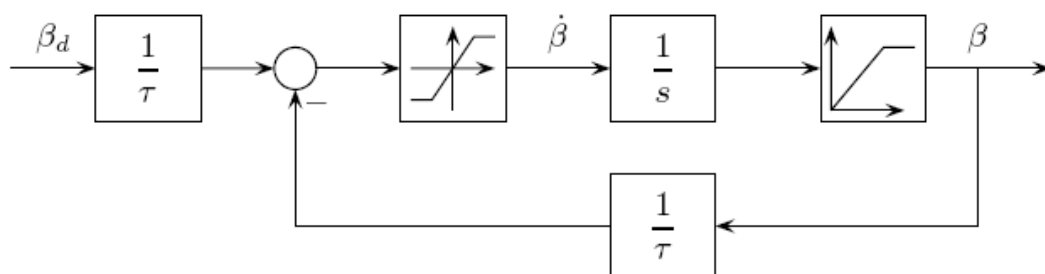
در میان سه نوع فوق، امروزه حرکت به سمت استفاده از مدل تغذیه دوگانه است چرا که کمتر از ۳۰ درصد توان نامی از مبدل ها عبور می کند و این از نظر هزینه بسیار مطلوب است. از طرف دیگر امکان کنترل توأم توان اکتیو و راکتیو وجود دارد و ماشین در هر سرعتی می تواند هر گشتاور ژنراتوری یا موتور را تولید کند. کنترل توان راکتیو در این ماشین می تواند توسط مبدل سمت شبکه نیز انجام شود. مبدل سمت رتور نیز با کنترل دامنه و فاز نسبی ولتاژ تغذیه سیم پیچ های رتور، در اصل دامنه و فاز جریان رتور و به تبع آن میدان و شار رتور و فاز آن نسبت به میدان و شار استاتور را کنترل می کند که به تبع آن گشتاور تنظیم می شود. با این توضیح مشخص است که برای کنترل این ماشین باید از روش های کنترل

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

برداری استاده کرد که در فصل ۳ تشریح خواهد شد. خود ماشین القایی تغذیه دوگانه نیز به تفصیل در فصل ۲ تجزیه و تحلیل خواهد شد.

### ۱-۶-۱ سیستم کنترل زاویه پره ها

برای تغییر زاویه پره های توربین بادی از موتورهای الکتریکی استفاده می شود. این سیستم بلوک دیاگرامی شبیه شکل ۱-۲۱ دارد. در این سیستم محدودیتهای حداقل و حداکثر زاویه پره ها از یک طرف (بین ۲- تا ۳۰ درجه) و حد سرعت تغییرات این زاویه (در حدود  $\pm 10$  درجه بر دقیقه) مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۲۰-

شکل ۱-۲۱: بلوک دیاگرام سیستم کنترل زاویه پره ها [۸]

WikiPower.ir

فصل دوم: مدلسازی و شبیه سازی ماشین القایی تغذیه دوگانه

برای آنکه بتوان یک پدیده فیزیکی را به صورت شبیه سازی کامپیوتری تحلیل کرد، لازم است مدل ریاضی آن به خوبی شناسایی شود و تمام اجزاء آن فهمیده شود. هدف اصلی در این فصل بدست آوردن مدل ریاضی و فهم دقیق عملکرد فیزیکی ماشین های القایی تغذیه دوگانه است تا پس از آن بتوان سیستم کنترلی مناسب را برای این ژنراتور در حال اتصال به توربین بادی طراحی و شبیه سازی کرد.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad ۲-۲$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad ۳-۲$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

با توجه به روابط ۱-۲ تا ۳-۲ دیده می شود که اگر روابط ۲-۲ و ۳-۲ در رابطه ۱-۲ قرارداد

شود، ضرایب متغیرهای دیفرانسیلی جریان  $\left( \frac{di_x}{dt} \right)$  تابعی از زاویه رتور خواهد بود که با زمان تغییر کرده و روابط را پیچیده می کند. نظریه قابهای گردان بر اساس تغییر متغیری به صورت رابطه ۲-۴ انجام می شود، که  $f$  می تواند ولتاژ، جریان و شار دور باشد.  $Kx$  ماتریس تبدیلی برای کمیت های رتور و استاتور است که در رابطه ۲-۶ تعریف شده است. اما بدون توجه به ماتریس  $Kx$  معادلات جدید با کمیت های  $f_x^{Kx}$  به صورت رابطه ۲-۵ خواهد بود.

$$f_x^{Kx} = K_x \square f_x \quad ۴-۲$$

$$K_x = K_{qd0x} \Rightarrow f_{qd0x} = K_{qd0x} \square f_x$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

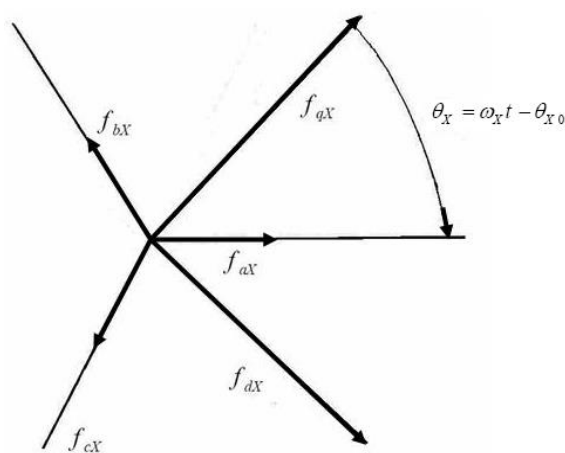
$$K_X^{-1} \square v_x^{K_X} = -R_X \square K_X^{-1} \square i_x^{K_X} + \frac{d}{dt} \left( K_X^{-1} \square \lambda_x^{K_X} \right)$$

$$\Rightarrow v_x^{K_X} = - \left( K_X \square R_X \square K_X^{-1} \right) i_x^{K_X} + K_X \frac{d}{dt} \left( K_X^{-1} \right) \lambda_x^{K_X} + \frac{d}{dt} \left( \lambda_x^{K_X} \right) \quad 5-2$$

$$K_X = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos \left( \theta_x - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_x + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_x & \sin \left( \theta_x - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta_x + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad 6-2$$

$$K_X^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_x & 1 \\ \cos \left( \theta_x - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta_x - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta_x + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta_x + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}$$

در تبدیل  $K_X$ ، همانطور که قبلاً هم گفته شد  $X$  می تواند رتور یا استاتور باشد و برای هر کدام  $K_X$  متفاوت باشد. با استفاده از این تبدیل متغیرهای جدید را روی محورهای  $qd0$  قابهای گردان فرض می شود که به صورت شکل ۱-۲ است.



شکل ۲۱-

شکل ۱-۲: ترتیب فازورهای گردان در تبدیل abc به qd0



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

حال اگر در رابطه ۲-۵ مقدار  $Kx$  را از رابطه ۲-۶ قرار دهیم، به رابطه ۲-۷ می رسیم. برای رسیدن به این رابطه از روابط مثلثاتی رابطه ۲-۸ استفاده شده است.

$$v_{qd0x} = -R_X i_{qd0x} + \frac{d\theta_x}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_{qd0x} + \frac{d}{dt} (\lambda_{qd0x}) \quad ۷-۲$$

$$\sin a \times \cos b = \frac{1}{2} [\sin(a+b) + \sin(a-b)]$$

$$\sin a \times \sin b = \frac{1}{2} [\cos(a-b) - \cos(a+b)] \quad ۸-۲$$

$$\cos a \times \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$$

در گام بعدی باید رابطه بین شاردهورها و جریانها را در فضای جدید بدست آوریم. بدین منظور از رابطه ۲-۲ و ۲-۶ استفاده می کنیم، در نتیجه رابطه ۲-۹ بدست می آید.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} K_s^{-1} \lambda_{qd0s} \\ K_r^{-1} \lambda_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_s^{-1} i_{qd0s} \\ K_r^{-1} i_{qd0r} \end{bmatrix} \quad ۹-۲$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} K_s^{-1} \lambda_{qd0s} \\ K_r^{-1} \lambda_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s K_s^{-1} & L_{sr} K_r^{-1} \\ (L_{sr})^T K_s^{-1} & L_r K_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i_{qd0r} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s K_s^{-1} & K_s L_{sr} K_r^{-1} \\ K_r (L_{sr})^T K_s^{-1} & K_r L_r K_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i_{qd0r} \end{bmatrix}$$

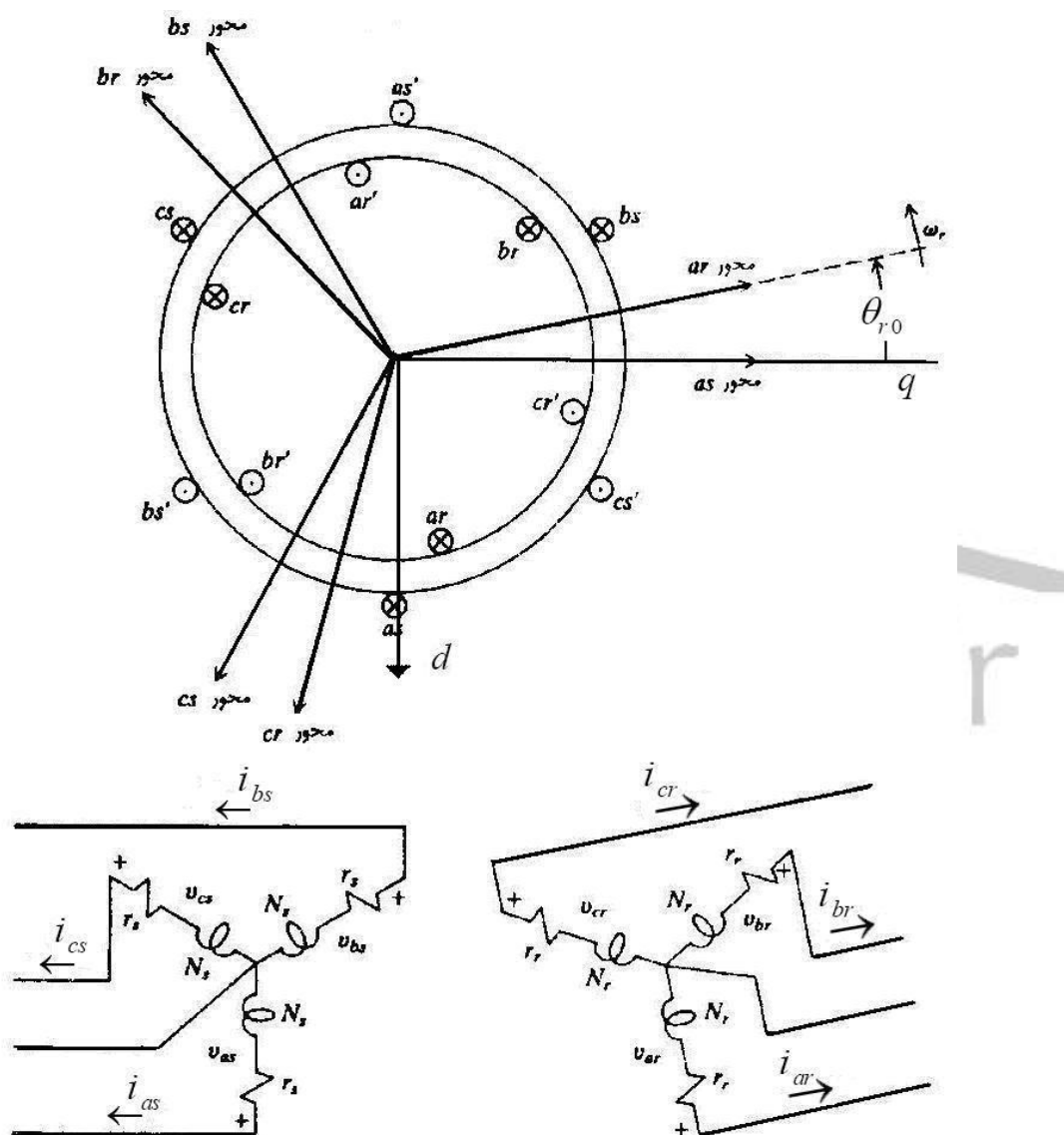
### ۱-۲-۲-۲-۱ مدل ژنراتوری ماشین القایی تغذیه دوگانه

در قسمت قبل تئوری قابهای گردان را به صورت عام مطرح کردیم. در این قسمت این تئوری را در مورد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه پیاده می کنیم. ماشین القایی تغذیه دوگانه، نوعی ماشین القایی رتور سیم پیچی است که روی سیم پیچ آن تغذیه سه فاز متعادل قرار گرفته است که میدان دوار ناشی از آن

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

هم سرعت با میدان دوار ناشی از تغذیه استاتور باشد. (شکل ۲-۲) بدین ترتیب فرکانس تغذیه رتور مطابق رابطه ۲-۱۰ خواهد بود. در این رابطه منظور از  $\omega_m^e$  سرعت مکانیکی رتور است که با توجه به چند قطب بودن سیم پیچی روی آن به سرعت الکتریکی تبدیل شده است.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} (2\pi f_s - \omega_m^e) \quad 2-10$$



شکل ۲-۲

شکل ۲-۲: ماشین القایی با جهت ژنراتوری

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

اگر ماتریس تبدیل رتور  $(K_r)$  و استاتور  $(K_s)$ ، را مطابق رابطه ۲-۱۱ تعریف کنیم، رابطه ۲-۹ به

رابطه ۲-۱۲ تبدیل می شود. در این روابط سرعت دوران قاب را سنکرون و زاویه اولیه مکانی فاز  $a$  رتور را صفر قرارداده ایم.

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & \cos \left( \omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \omega_s t & \sin \left( \omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad 11-2$$

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos [(\omega_s - \omega_r)t] & \cos \left[ (\omega_s - \omega_r)t - \frac{2\pi}{3} \right] & \cos \left[ (\omega_s - \omega_r)t + \frac{2\pi}{3} \right] \\ \sin [(\omega_s - \omega_r)t] & \sin \left[ (\omega_s - \omega_r)t - \frac{2\pi}{3} \right] & \sin \left[ (\omega_s - \omega_r)t + \frac{2\pi}{3} \right] \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s K_s^{-1} & K_s L_{sr} K_r^{-1} \\ K_r (L_{sr})^T K_s^{-1} & K_r L_r K_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0s} \\ -i_{qd0r} \end{bmatrix}$$

$$K_s L_s K_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}, L_s = L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$K_r L_r K_r^{-1} = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix}, L_r = L_{lr} + \frac{3}{2} L_{mr} \quad 12-2$$

$$K_s L_{sr} K_r^{-1} = K_r (L_{sr})^T K_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix}$$

$$L_m = L_{mr} = L_{ms}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱-۲-۷-۱ الف. معادلات ولتاژ

از رابطه ۲-۷ معادلات ولتاژی مطابق رابطه ۲-۱۳ بدست می آید و رابطه بین شاردهورها و جریان ها مطابق رابطه ۲-۱۴ است.

$$\begin{cases} v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d \lambda_{qs}}{dt} \\ v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d \lambda_{ds}}{dt} \\ v_{0s} = -R_s i_{0s} + \frac{d \lambda_{q0}}{dt} \end{cases} \quad 13-2$$

$$\begin{cases} v_{qr} = -R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{ds} + \frac{d \lambda_{qr}}{dt} \\ v_{dr} = -R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qs} + \frac{d \lambda_{dr}}{dt} \\ v_{0r} = -R_r i_{0r} + \frac{d \lambda_{q0}}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qs} \\ -i_{qr} \end{bmatrix} \quad 14-2$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{ds} \\ -i_{dr} \end{bmatrix}$$

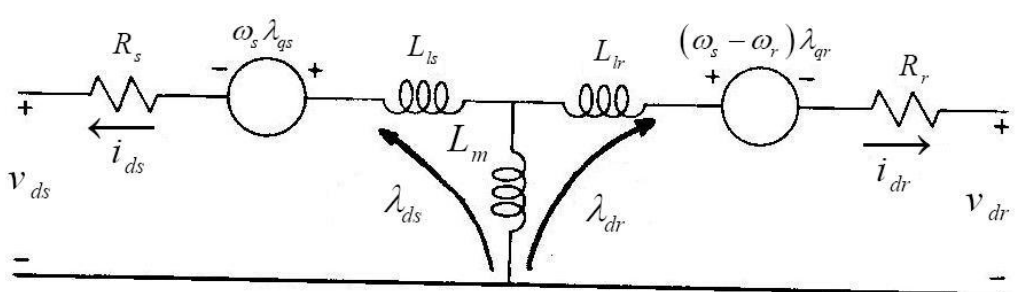
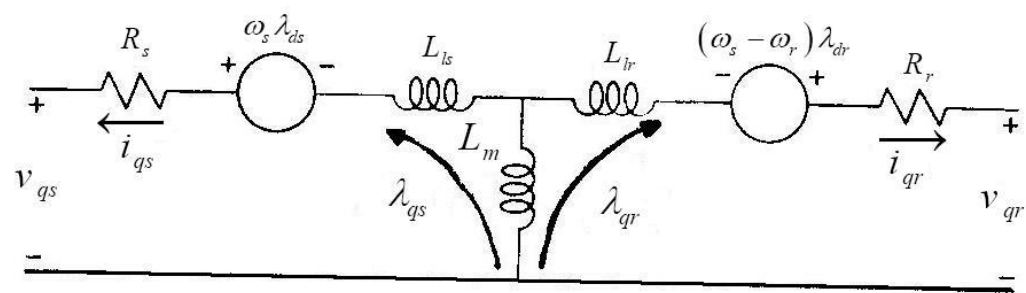
روابط ۲-۱۳ و ۲-۱۴ را به صورت شکل ۲-۳ بدست می آید. اگر ولتاژهای متقارن مطابق رابطه

۲-۱۵ به پایانه های ماشین متصل گردد، ولتاژهای قاب **qd** مطابق رابطه ۲-۱۶ خواهد بود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر سایت و به همراه فونت های لازمه

$$\begin{cases} v_{as} = V_{ms} \cos \omega_s t \\ v_{bs} = V_{ms} \cos \left( \omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_{cs} = V_{ms} \cos \left( \omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}, \begin{cases} v_{ar} = V_{mr} \cos \left[ (\omega_s - \omega_r) t + \theta_{vr0} \right] \\ v_{br} = V_{mr} \cos \left[ (\omega_s - \omega_r) t + \theta_{vr0} - \frac{2\pi}{3} \right] \\ v_{cr} = V_{mr} \cos \left[ (\omega_s - \omega_r) t + \theta_{vr0} + \frac{2\pi}{3} \right] \end{cases} \quad 15-2$$

$$\begin{cases} v_{qs} = V_{ms} \\ v_{ds} = 0 \end{cases}, \begin{cases} v_{qr} = V_{mr} \cos \theta_{vr0} \\ v_{dr} = -V_{mr} \sin \theta_{vr0} \end{cases} \quad 16-2$$



شکل ۲۳-

شکل ۲-۳: مدل ماشین القایی با جهت ژنراتوری در قاب سنکرون

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱-۷-۲-۲-ب. عملکرد حالت متقارن دائم [۱۰]

دانستن دو رابطه اساسی هنگام تحلیل حالت دائم متقارن ضروری است. این روابط با مرجع قاب گردان با سرعت سنکرون در رابطه ۲-۱۷ آمده است.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &= J(\omega_s - \omega_{qd0}) = 0 \\ \sqrt{2}\bar{F}_{as} &= F_{qs} - JF_{ds} \end{aligned} \quad 17-2$$

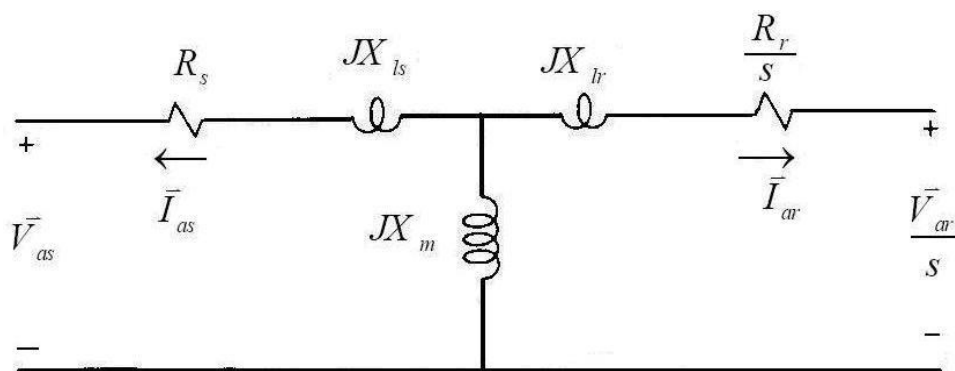
حال معادلات ولتاژی رابطه ۲-۱۳ را با توجه به رابطه ۲-۱۷ بازنویسی می کنیم:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{as} &= V_{qs} - JV_{ds} = -R_s(i_{qs} - Ji_{ds}) + \omega_s(\lambda_{ds} + J\lambda_{qs}) \\ &= -R_s\bar{I}_{as} + J\omega_s(\lambda_{qs} - J\lambda_{ds}) \\ \vec{V}_{ar} &= V_{qr} - JV_{dr} = -R_r\bar{I}_{ar} + J(\omega_s - \omega_r)(\lambda_{qr} - J\lambda_{dr}) \\ &= -R_r\bar{I}_{ar} + sJ\omega_s(\lambda_{qr} - J\lambda_{dr}) \end{aligned} \quad 18-2$$

شاردورها را از رابطه ۲-۱۴ در رابطه ۲-۱۸ قرار داده و رابطه ۲-۱۹ و شکل ۲-۴ بدست می آید.

$$\begin{aligned} \vec{V}_{as} &= V_{qs} - JV_{ds} = -R_s\bar{I}_{as} + J\omega_s(\lambda_{qs} - J\lambda_{ds}) \\ &= -R_s\bar{I}_{as} - J\omega_s \left( \left( (L_{ls} + L_m)i_{qs} + L_m i_{qr} \right) - \left( J((L_{ls} + L_m)i_{ds} + L_m i_{dr}) \right) \right) \\ &= -R_s\bar{I}_{as} - J\omega_s \left( \begin{array}{l} L_{ls}(i_{qs} - Ji_{ds}) + \\ L_m \left( (i_{qs} - Ji_{ds}) + (i_{qr} - Ji_{dr}) \right) \end{array} \right) \\ &= -R_s\bar{I}_{as} - J(X_{ls}\bar{I}_{as} + X_m(\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar})) \\ &= -(R_s + JX_{ls})\bar{I}_{as} - JX_m(\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar}) \\ \vec{V}_{ar} &= V_{qr} - JV_{dr} = -(R_r + sJX_{lr})\bar{I}_{ar} - sJX_m(\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar}) \\ \Rightarrow \frac{\vec{V}_{ar}}{s} &= -\left( \frac{R_r}{s} + JX_{lr} \right)\bar{I}_{ar} - JX_m(\bar{I}_{as} + \bar{I}_{ar}) \end{aligned} \quad 19-2$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲۴-

شکل ۲- ۴: مدار معادل حالت دائمی ماشین القایی تغذیه دوگانه

۱-۷-۲-۳- ج. روابط توان و گشتاور [۱۲و۱۱،۱۰]

حال که مدل ریاضی به صورت کامل بدست آمد، باید روابط توان های اکتیو و راکتیو و گشتاور را در فضای **qdo** بدست آوریم. توان های اکتیو و راکتیو و گشتاور در فضای ریاضی **abc** از رابطه ۲- ۲۰ بدست می آیند.

$$P = v \cdot i = VI \cos(\phi_v - \phi_i)$$

$$Q = VI \sin(\phi_v - \phi_i)$$

۲۰-۲

$$T_{em} = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = (i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} (L_{sr}) i_{abcr}$$

اگر تبدیل های رابطه ۲- ۱۱ را به رابطه ۲- ۲۰ اعمال کنیم رابطه ۲- ۲۱ برای مقادیر توان اکتیو و راکتیو و گشتاور بدست می آید.

$$P_t = P_s + P_r = (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + v_{0s} i_{0s}) + (v_{qr} i_{qr} + v_{dr} i_{dr} + v_{0r} i_{0r})$$

$$Q_t = Q_s + Q_r = (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) + (v_{qr} i_{dr} + v_{dr} i_{qr})$$

۲۱-۲

$$T_{em} = \left[ (K_s)^{-1} i_{qd0s} \right]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} (L_{sr}) (K_r)^{-1} i_{qd0r} = -\frac{3}{2} (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr})$$

منفی بودن ضریب گشتاور به خاطر جهت جریان است که به صورت ژنراتوری در نظر گرفته شده است. اما برای کمیت های توانی این منفی لازم نیست بلکه توجه به جهت توان اهمیت دارد. در این

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

روابط توان ناظر به حالت ژنراتوری بدست می آید یعنی توان مثبت نشان دهنده تولید توان توسط ماشین و انتقال آن به شبکه است.

### ۱-۸-۲-۲. نتایج شبیه سازی

در این قسمت نتایج مدل ریاضی بدست آمده در قسمت ۱-۲ با مدل ایده آلی که در نرم افزار سرهم شده است مقایسه می شود. برای این منظور از مدل های **MathModel** و **MatLabDFIGModel** استفاده شده است. مدل **MathModel** مطابق روابط ریاضی بدست آمده در قسمت ۱-۲ ساخته شده است. در مدل **MatLabDFIGModel** نیز از مدل ماشین القایی رتور سیم پیچی استاندارد نرم افزار **MATLAB** استفاده شده است. برای تغذیه نیز تمام مبدل های توان به صورت ایده آل ساخته شده است. بدین صورت که سیگنال مورد نظر تولید شده و سپس توسط یکی از ابزارهای نرم افزار به جریان توانی تبدیل شده است. این عمل اثر قدرت شبکه (سطح اتصال کوتاه) روی پاسخ ماشین را بر طرف می کند.

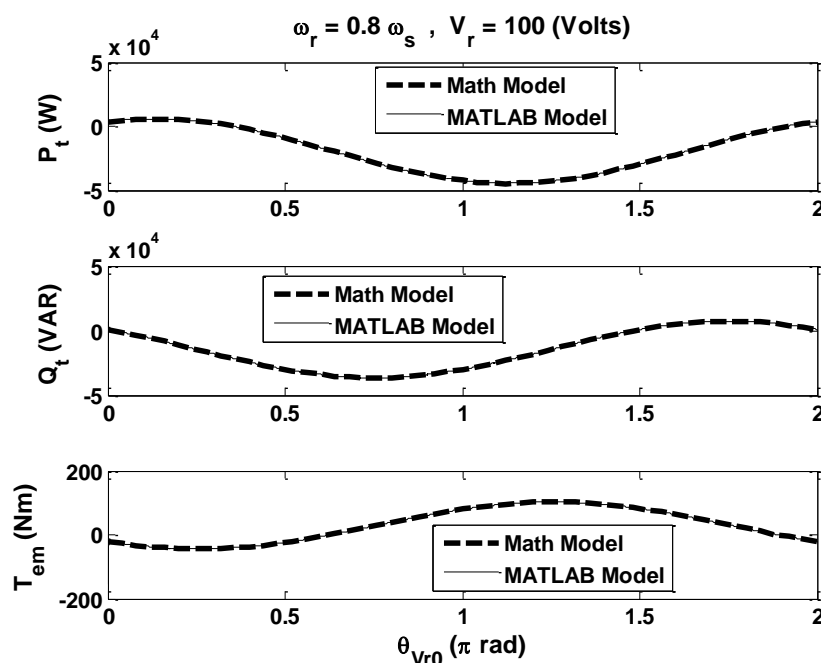
### ۱-۸-۱-۲-۲. عملکرد حالت دائم

#### ۱-۸-۱-۱ الف. ورودی مشخص

در ولتاژ ثابت استاتور و سرعت ثابت رتور، دامنه و فاز نسبی ولتاژ رتور تغییر داده شده است و مقادیر توان اکتیو و راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به تذکر است که جریان ها به صورت ژنراتوری در نظر گرفته شده است بدین معنی که توان مثبت، نشان دهنده تولید است. شکل ۲-۵ مقایسه رفتار دو مدل را نشان می دهد علت تفاوت آغازین نتایج این است که در مدل ریاضی ترم های تغییرات گشتاور بر حسب زمان حذف شده است ولی در مدل نرم افزار قابل حذف نیست. البته در تحلیل حالت دائم نیازی به این ترم نیست. (**SSCompare, MathModel**) پس از مشاهده انطباق کامل دو مدل، رفتار ماشین القایی تغذیه دوگانه برای مقادیر مختلف دامنه و ولتاژ تغذیه رتور در شکل ۲-۶ بررسی شده است. (**SSCompare2, MathModel**)

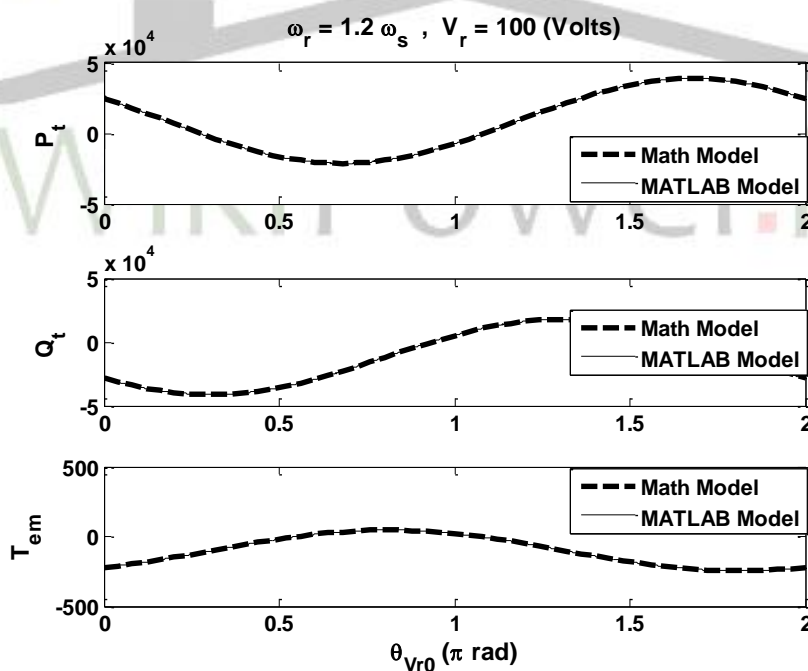


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



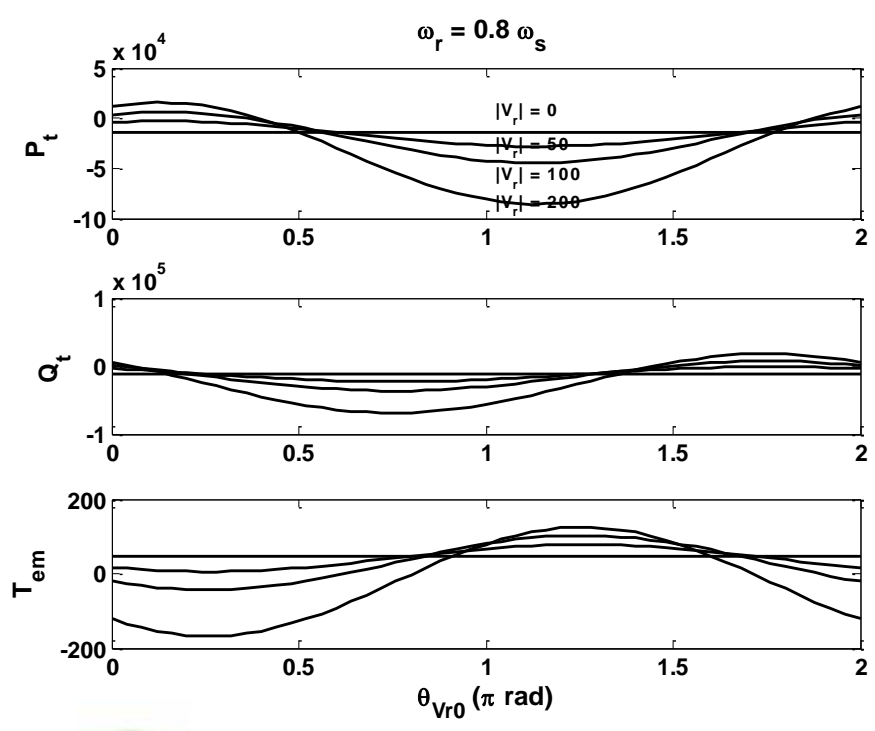
شکل ۲۵-

شکل ۲-۵ الف: مقایسه گشتاور و توان تولیدی مدل ریاضی و مدل ایده آل نرم افزاری DFIG، در پایین تر از سرعت سنکرون ( $s = +0.2$ ) ناشی از تغییرات اختلاف فازی نسبی ولتاژ رتور نسبت به استاتور



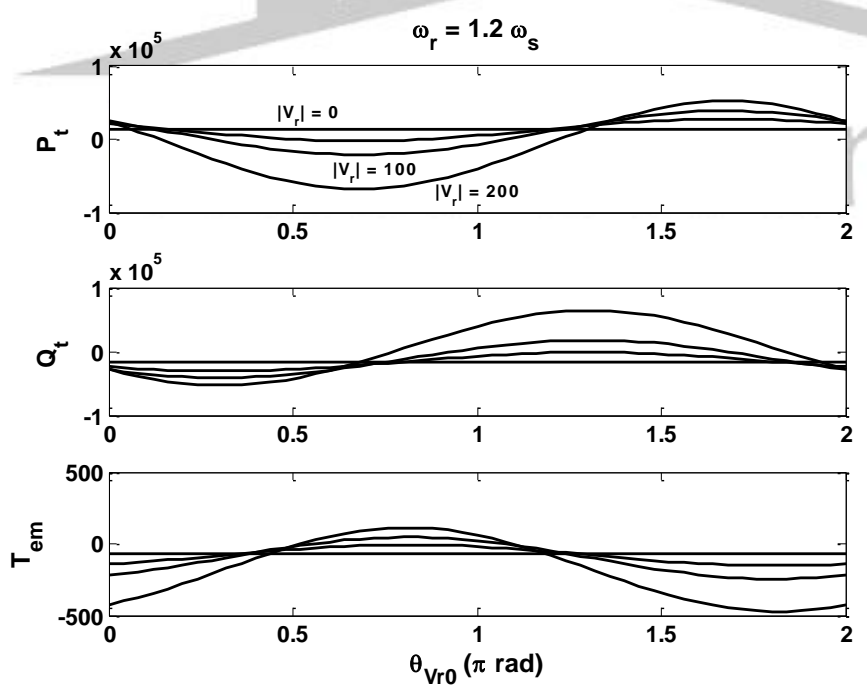
شکل ۲-۵ ب: مقایسه گشتاور و توان تولیدی مدل ریاضی و مدل ایده آل نرم افزاری DFIG، در بالاتر از سرعت سنکرون ( $s = -0.2$ ) ناشی از تغییرات اختلاف فازی نسبی ولتاژ رتور نسبت به استاتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲۶-

شکل ۲-۶ الف: تغییرات گشتاور و توان تولیدی DFIG در پایین تر از سرعت سنکرون ( $s=+0.2$ ) ناشی از تغییرات اختلاف فازی نسبی ولتاژ رتور نسبت به استاتور برای چند مقدار مختلف ولتاژ رتور



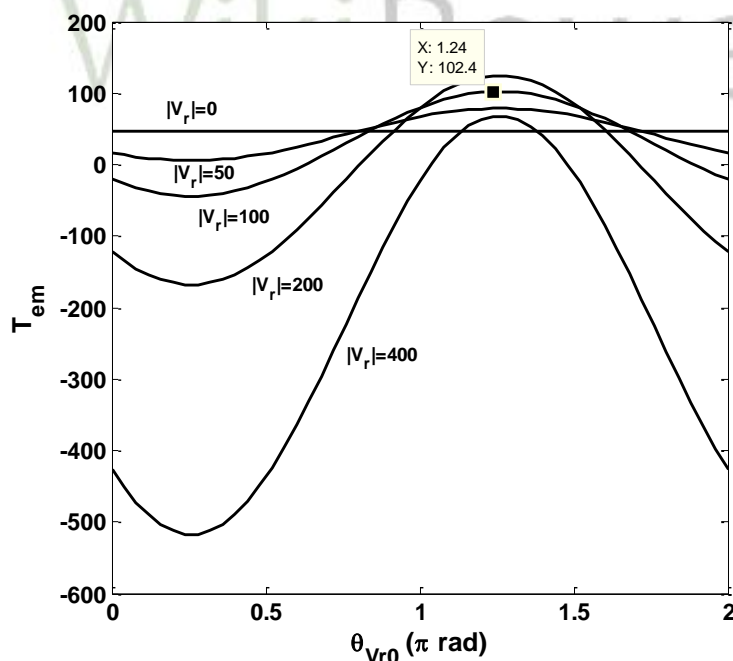
شکل ۲۷-

شکل ۲-۶ ب: تغییرات گشتاور و توان تولیدی DFIG در بالاتر از سرعت سنکرون ( $s=-0.2$ ) ناشی از تغییرات اختلاف فازی نسبی ولتاژ رتور نسبت به استاتور برای چند مقدار مختلف ولتاژ رتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

### ۱-۸-۱-۲-ب. حداکثر گشتاور

در یک سرعت خاص می توان دو متغیر مانند گشتاور و توان راکتیو را توأمان کنترل کرد. البته باید توجه داشت که گشتاور در شرایط ثابت پارامترهای ماشین، ولتاژ استاتور و سرعت رتور محدود است. برای بدست آوردن مقدار حداکثر گشتاور ماشین القایی تغذیه دوگانه مدل **TemMax** را تشکیل داده ایم. در قدم اول ابتدا اثر تغییرات زاویه نسبی ولتاژ رتور را بررسی کرده ایم که نتیجه آن در شکل ۲-۷- الف آمده است. (**TmaxTetaPlot**) دیده می شود که برای مقادیر مختلف دامنه ولتاژ رتور، زاویه فاز ولتاژ متناظر  $\theta_{Vr0max} = \theta_{max}$  (با مقدار بیشینه گشتاور عددی ثابت است. اما شکل ۲-۷- ب نشان می- دهد که این مقدار برای سرعت های مختلف تفاوت می کند. (حدوداً برابر  $0.8\pi$  برای  $s = -0.2$  و  $1.24\pi$  برای  $s=0.2$ ). همین مقادیر را برای زاویه ولتاژ رتور ثابت نگه داشته دامنه ولتاژ رتور را به صورت پیوسته تغییر می دهیم. (**TmaxVrPlot**) دیده می شود که برای مقدار مشخص ولتاژ استاتور، یک مقدار بیشینه دارد. (شکل ۲-۷- ج و شکل ۲-۷- د) البته در شکل های فوق نیز این واقعیت دیده می شود که با افزایش ولتاژ رتور از ۵۰ به ۱۰۰ و ۲۰۰، بیشینه مقدار گشتاور افزایش می یابد ولی برای ولتاژ ۴۰۰، این مقدار کاهش می یابد.

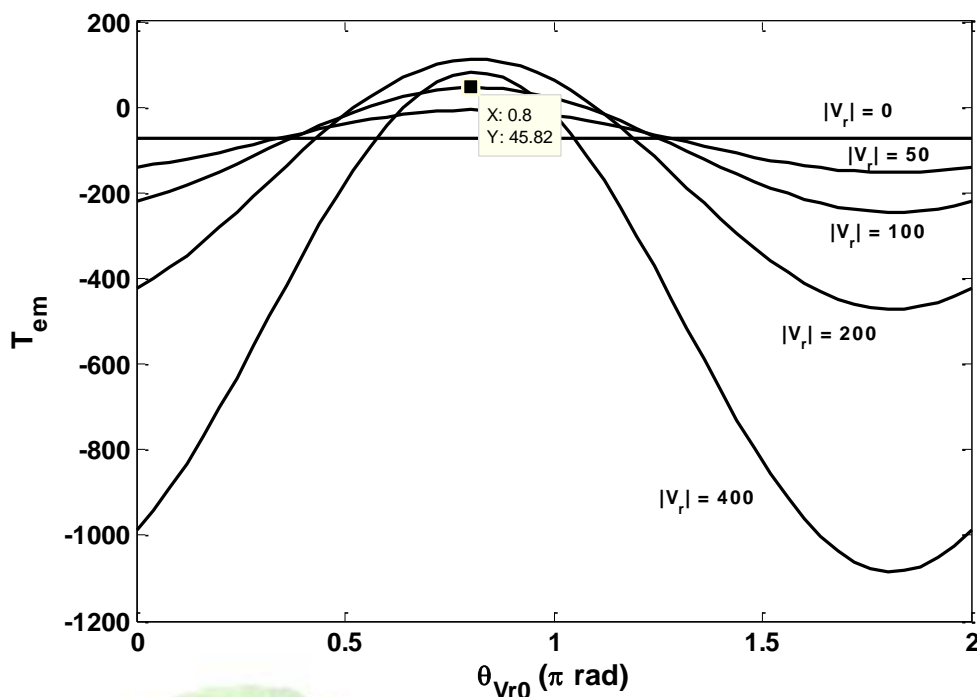


شکل ۲۸-

شکل ۲-۷- الف: تغییرات گشتاور در  $s = +0.2$  بر حسب تغییرات فاز ولتاژ رتور برای چند مقدار متفاوت ولتاژ

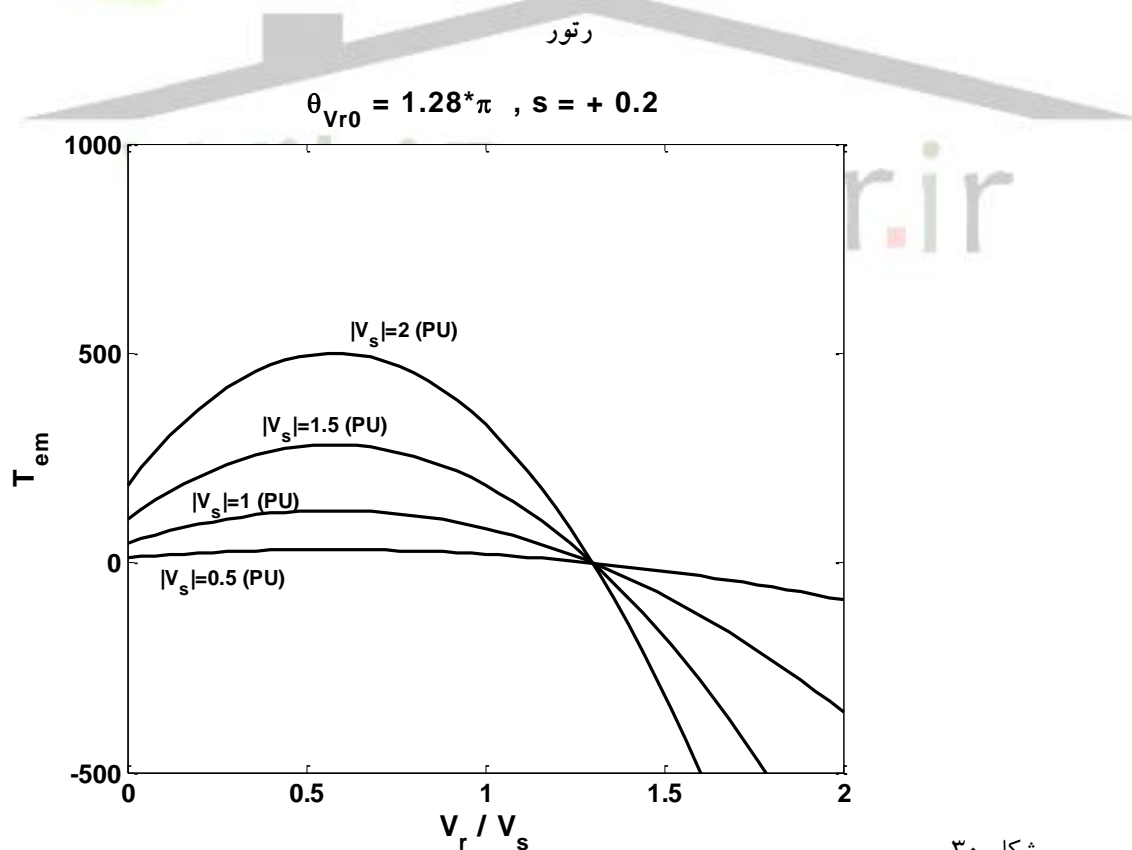
رتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲۹-

شکل ۲-۷ ب: تغییرات گشتاور در  $s = -0.2$  بر حسب تغییرات زاویه ولتاژ رتور برای چند مقدار متفاوت ولتاژ

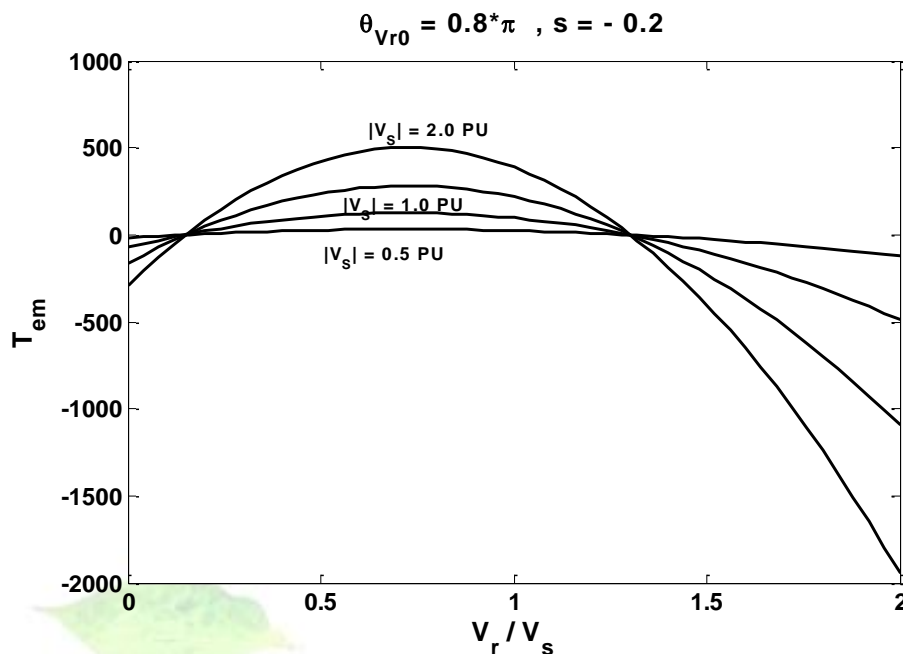


شکل ۳۰-

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

شکل ۲-۷ ج: تغییرات گشتاور در  $s = +0.2$  بر حسب تغییرات ولتاژ رتور با فاز ثابت برای چند مقدار ولتاژ

استاتور



شکل ۳۱-

شکل ۲-۷ د: تغییرات گشتاور در  $s = -0.2$  بر حسب تغییرات  $V_r$  با فاز ثابت برای مقادیر مختلف  $V_s$

با استفاده از شکل ۲-۷ ج و شکل ۲-۷ د مقدار دامنه و زاویه نسبی ولتاژ رتور نسبت به ولتاژ استاتور را برای رسیدن به نقطه حداکثر گشتاور برای سرعت خاص  $s = -0.2$  بدست آوردیم، از مقایسه نمودارهای مشابه این دو شکل برای سرعتهای مختلف همچنین مشاهده می شود که حداکثر گشتاور تولیدی در تمام سرعتها یکسان است. (جدول ۲-۱) (**TemMax, TemVrPlot2**) بدین ترتیب برای یک ماشین القایی تغذیه دوگانه متصل به شبکه، حداکثر گشتاور (مثبت و منفی) عددی مشخص و ثابت است. این مقدار را می توان یک بار محاسبه و در تمام شبیه سازی ها مورد استفاده قرار داد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

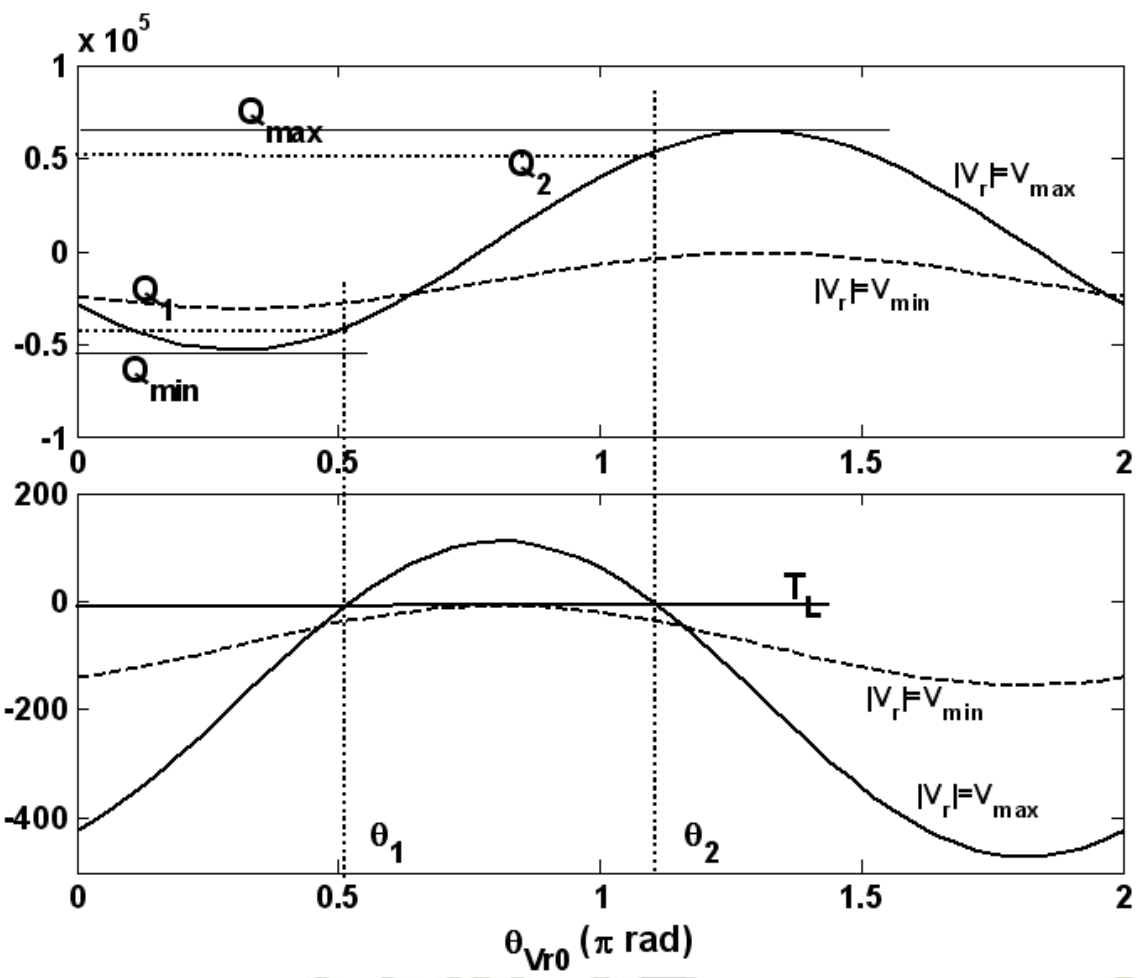
جدول ۱-۲: گشتاور بیشینه مطلق برای مقادیر مختلف سرعت

s	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\theta_{\max}$	0.72	0.72	0.76	0.8	0.88	1.16	1.24	1.32	1.4	1.44
$T_{em}$	13.37	18.72	28.27	45.82	73.42	106.01	102.41	94.03	84.79	76.1
$\left(\frac{ V_r }{ V_s }\right)_{\max}$	1.28	1.08	0.88	0.72	0.6	0.48	0.56	0.72	0.88	1.08
$T_{em \max}$	124.93	125.37	125.4	125.17	125.19	125.05	125.13	125.16	125.4	125.28

### ۱-۸-۱-۳-ج. محدود توان راکتیو

فرض کنیم گشتاور باری برای یک سرعت خاص مشخص باشد، از نتایج بدست آمده می دانیم که ترکیبهای مختلفی از دامنه و فاز نسبی ولتاژ تغذیه رتور نسبت به ولتاژ تغذیه استاتور، می تواند این گشتاور را تولید کند؛ برای مشخص شدن یک نقطه کار می توان پارامتر دیگری مانند توان راکتیو را نیز کنترل کرد. اما با توجه به گشتاور، محدوده تغییرات توان راکتیو چقدر است؟ شکل ۲-۸ که از روی شکل ۲-۷-ب ساخته شده است به صورت نمونه، محدوده تغییرات توان راکتیو را نشان می دهد. این محدوده یعنی  $[Q_{\min} \text{ or } Q_1, Q_{\max} \text{ or } Q_2]$  وابسته به سرعت و گشتاور است. در این شکل  $V_{\min}$  و  $V_{\max}$  از روی منحنی تغییرات گشتاور بیشینه نسبت به تغییرات فاز ولتاژ رتور و نسبت  $|V_r|/|V_s|$  بدست می آید.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳۲-

شکل ۲-۸: محدوده تغییرات توان راکتیو با توجه به گشتاور بار

در عمل اگر بخواهیم محدوده مجاز توان راکتیو را بدست آوریم از ترتیب رابطه ۲-۲۲ استفاده می کنیم.

برای مشخص کردن همزمان محدوده توان راکتیو مدل **DFIGSolve** طراحی شده است. در این مدل مراحل فوق پیاده سازی شده است. این پیاده سازی به علت تازه بودن با ریزه کاریهای متعددی همراه بوده است که در ادامه به تشریح آنها می پردازیم.

در قدم اول از روی سرعت، زاویه متناظر گشتاور بیشینه ( $\theta_{max}$ ) و نسبت دامنه ولتاژ رتور به استاتور

متناظر با گشتاور بیشینه  $K_{V_{max}} = \left( \frac{|V_r|}{|V_s|} \right)_{max}$ ، با استفاده از جدول داده ها<sup>۱</sup> بدست می آید. این جدول از

روی مقادیر جدول ۲-۱ ساخته شده است.

<sup>۱</sup> Lookup Table

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

$$(\omega_r \vee s) \xRightarrow{\text{Look Up Table}} \begin{cases} \theta_{\max} \\ V_{r \max} = \left( \frac{|V_r|}{|V_s|} \right)_{\max} \times V_s \end{cases}$$

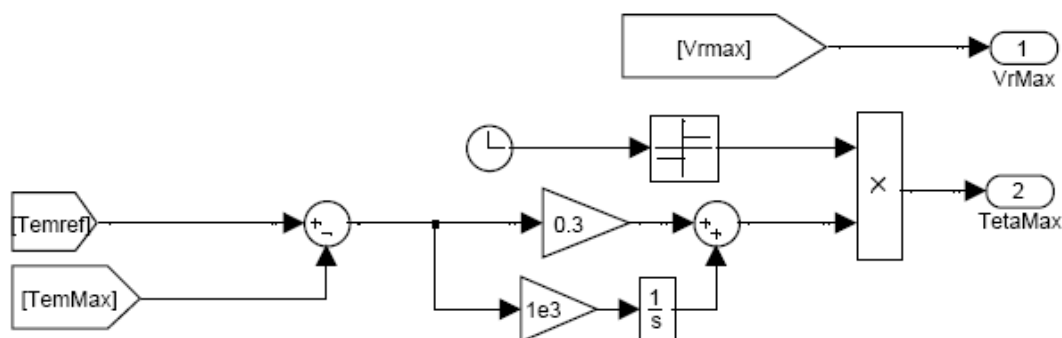
$$1. \quad \begin{cases} \theta_{\max} \\ T_L \end{cases} \xRightarrow{\text{FeekBack Solution}} V_{r \min} \quad ۲۲-۲$$

$$2. \quad \begin{cases} V_{r \max} \\ T_L \end{cases} \xRightarrow{\text{FeekBack Solution}} \theta_1 \xRightarrow{\theta_2 = 2\theta_{\max} - \theta_1} \theta_2$$

$$3. \quad \begin{cases} \theta_1 \\ \theta_2 \end{cases} \xRightarrow{\text{Time Min/Max}} \begin{cases} Q_t \max \\ Q_t \min \end{cases}$$

در گام دوم لازم است زوایای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  بدست آید. از روی تقارن نمودارهای گشتاور، به شکل ۲-۸ تنها کافی است یکی از دو مقدار بدست آید و زاویه دیگر از رابطه ۲-۲۳ بدست می آید. برای بدست آوردن مقدار  $\theta_1$  نیز از روش حل فیدبک استفاده شده است. (شکل ۲-۹) در این مورد کمیتی که باید تنظیم شود گشتاور است و کمیت متغیر زاویه ولتاژ تغذیه رتور، دامنه ولتاژ تغذیه رتور نیز مقدار  $V_r = K_{V \max} \times V_s$  می باشد.

$$\theta_2 = 2\theta_{\max} - \theta_1 \quad ۲۳-۲$$



شکل ۳۳-

شکل ۲-۹: مدار فیدبک برای بدست آوردن مقادیر مناسب فاز ولتاژ تغذیه رتور برای تولید گشتاور مشخص در یک سرعت ثابت



## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در گام سوم هدف بدست آوردن محدوده کمینه و بیشینه مقدار توان راکتیو در بازه تغییرات فاز ولتاژ رتور بین دو مقدار بدست آمده است.  $([\theta_1, \theta_2])$  بدین منظور بلوک **QMima** در مدل **DFIGSolve** طراحی شده است. این بلوک به صورت مداوم با داشتن دامنه ولتاژها، سرعت و بازه تغییرات فاز ولتاژ رتور، مقدار کمینه و بیشینه توان رکتیو را نشان می دهد. از آنجا که سرعت پاسخ مدار فیدبک شکل ۲-۹ در حدود ۰/۰۰۱ ثانیه است، دوره تناوب حل این قسمت را ۰/۰۱ ثانیه (**Ksolve**) قرار داده ایم. (به خاطر محدودیت محاسبات و بزرگ بودن توان راکتیو، به هر میزان که دوره محاسبات بزرگتر باشد، نتیجه دقیقتر خواهد بود. به عنوان راه حل دیگر باید گام محاسبات ریاضی این قسمت را کاهش داد مثلاً برای حداکثر گام ۰/۰۰۰۱، برای حداکثر تابع  $10^4 \times 7$  خطای محاسبات در بازه ۰/۰۰۲ حدود  $10^4 \times 0.4$  است یعنی چیزی حدود ۶ درصد اما اگر گام محاسبات را ۱۰ برابر کوچک کنیم، این خطا نیز ۱۰ برابر کوچک می شود. اگر دوره محاسبات را نیز ۱۰ برابر بزرگتر کنیم همین بهبود دیده می شود.) البته این مقدار با توجه به ماهیت رفتاری ماشین می تواند متفاوت باشد. مثلاً برای موردی که تغییرات سرعت و گشتاور در چند ثانیه اتفاق می افتد لزومی به این حجم محاسبات وجود ندارد و می توان دوره حل را حتی ۱ ثانیه قرار داد.

در این بلوک ابتدا  $\theta_1$  بدست آمده به زاویه ای در بازه  $[0, 2\pi]$  تبدیل می شود. مقدار **teta1** زمانی تثبیت می شود که سرعت تغییرات زاویه **TetaMax=TETAr0max** (مشتق این کمیت) از حدی کمتر باشد.

سپس زاویه **teta2** با استفاده از رابطه ۲-۲۳ بدست می آید. بعد از این مرحله مقادیر **Teta1F** و **Teta2F** که ترتیب کمیتی دارند (**Teta1F < Teta2F**) بدست می آیند و همه چیز مهیای محاسبات کمینه و بیشینه توان راکتیو است.

برای داشتن مقدار توان راکتیو لازم است مدل ماشین جدا از باقی مدار (در هر مدل) بدست آید. بدین منظور مدل ریاضی ماشین به صورت مجزا (البته با ولتاژ استاتور و سرعت یکسان با کل شبکه) بازسازی شده و با تغییر زاویه فاز ولتاژ رتور در دامنه مشخص **VrMax**، تابع تغییرات توان راکتیو بدست می آید. حال لازم است در قدم آخر محدودیت بازه  $[\theta_1, \theta_2]$  اعمال شده و مقادیر بیشینه و کمینه توان راکتیو در این بازه بدست آید. بدین منظور بلوک **MiMa** طراحی شده است.

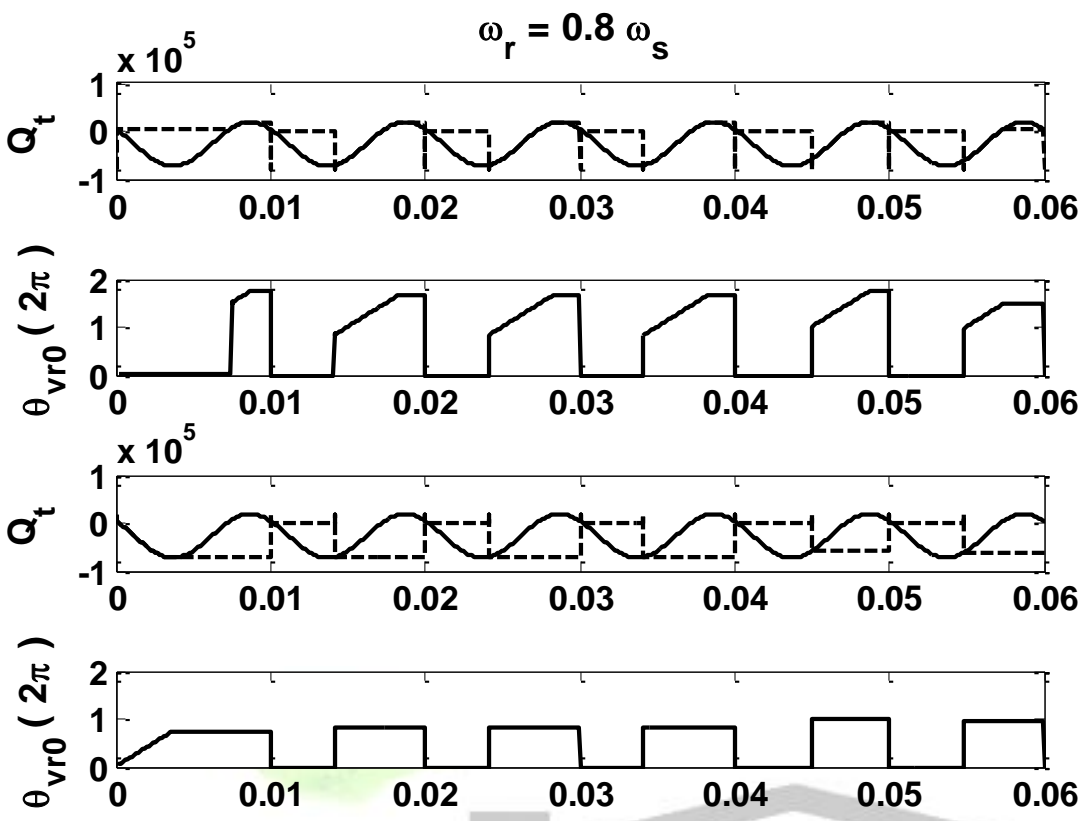
## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در بلوک **MiMa** با گرفتن مقادیر تابع تغییرات توان راکتیو بر حسب تغییرات زاویه فاز ولتاژ رتور و بازه  $[\theta_1, \theta_2]$  مقادیر بیشینه و کمینه توان رکتیو در این بازه و زاویه متناظر با آن مقادیر مشخص می شود. مهمترین جزء محاسباتی این بلوک تابع **MinMax Running Resettable** می باشد. اما یک مشکل در این تابع وجود دارد و اینکه برای حل تکراری و متناوب مناسب نیست و باید به صورت بیرونی در ابتدای هر دوره تحلیل مقدار دهی اولیه شود. این مقادیر اولیه برای تابع **Min** و **Max** متفاوت است. این مقادیر باید به گونه ای تنظیم شود که با شروع تحلیل در دوره جدید مقداری خروجی تابع برابر با اولین مقدار تابع مورد بررسی (**QtQ**) باشد. به همین دلیل مقدار اولیه تابع **Min** برابر مقدار بزرگ  $2 \times 10^4$  و برای تابع **Max** مقدار منفی بزرگ  $8 \times 10^4 -$  در نظر گرفته شده است. (این مقادیر برای توابع مختلف تفاوت خواهد کرد).

در بلوک **MiMa** تابع ورودی (**QtQ**) تا قبل از زاویه  $\theta_1$  در مقدار صفر ضرب می شود. در حین بازه  $[\theta_1, \theta_2]$  در یک و پس از  $\theta_2$  نیز در صفر ضرب می شود. اما برای آنکه مقادیر صفر در نتیجه نهایی بی تأثیر باشد لازم است هنگام بدست آوردن مقدار کمینه و بیشینه تابع **MinMax Running Resettable** در زاویه  $\theta_1$  مقدار دهی اولیه<sup>۱</sup> شود. در تمهید آخر لازم است مقدار بدست آمده، پس از زاویه  $\theta_2$  نیز حفظ شود و با صفر شدن تابع ورودی تحت تأثیر قرا نگیرد به همین خاطر، در این بازه  $[\theta_2, 2\pi]$  همان مقدار اولیه به جای تابع ورودی قرار می گیرد تا هر جواب بدست آمده در انتهای بازه  $[\theta_1, \theta_2]$  تا ابتدای دوره تحلیل بعد باقی بماند. (به عنوان راه حل دیگر می توان در این بازه مقدار خروجی را به جای تابع ورودی قرار داد.) در شکل ۲-۱۰ این محاسبات در سرعت **s = 0.2** و برای دو حالت گشتاور ۲۰ و ۸۰، به صورت نمونه آمده است. (**QSolvePlot**) در شکل ۲-۱۱ نیز قسمتی از این تحلیل بزرگنمایی شده است.

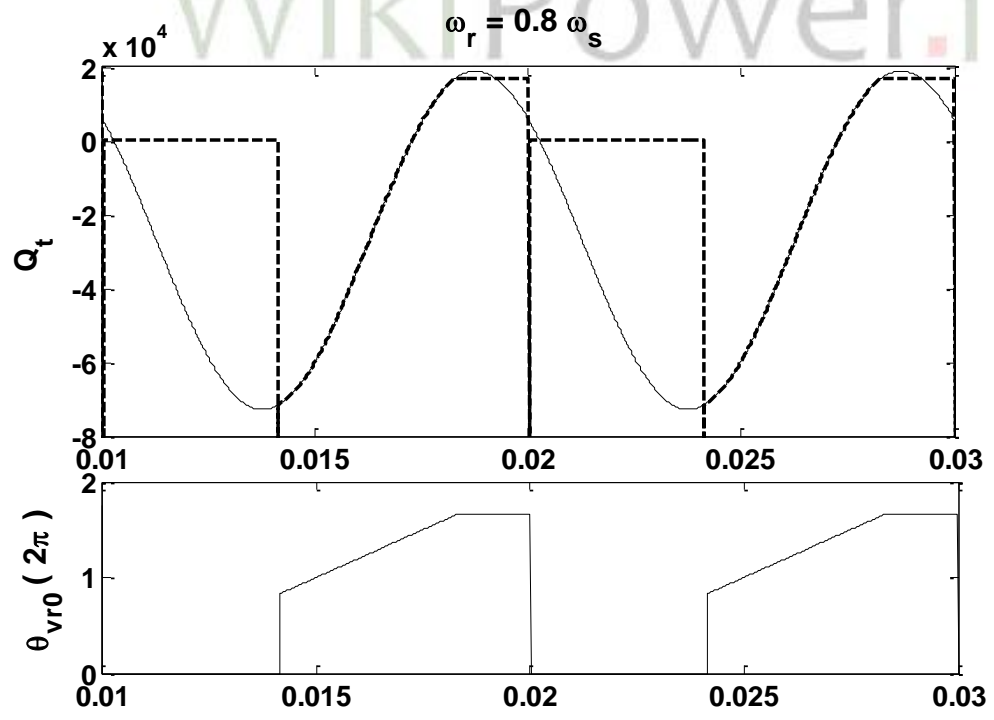
<sup>۱</sup> reset

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳۴-

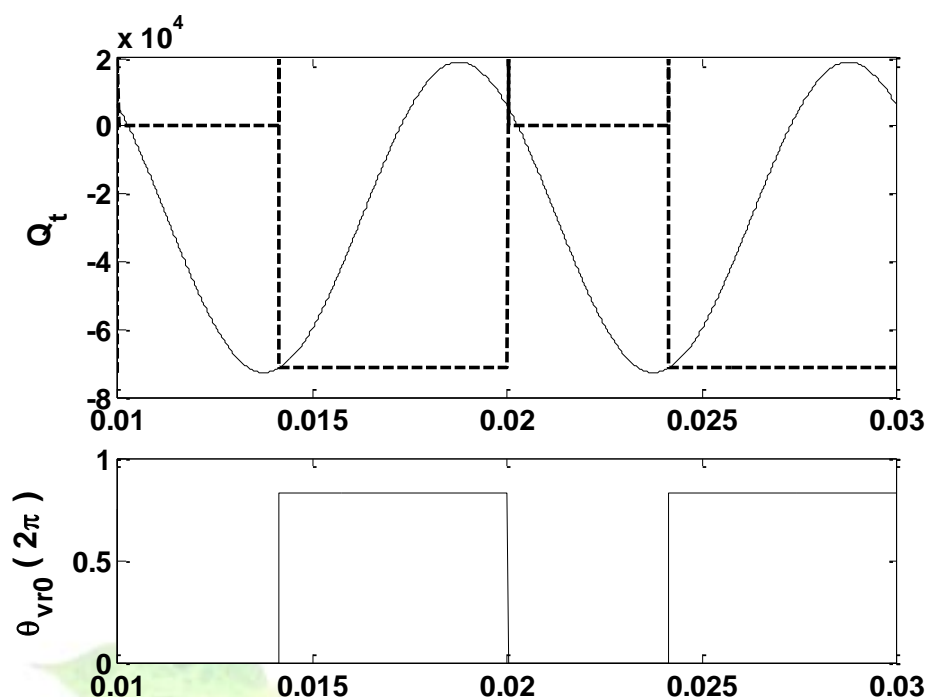
شکل ۲-۱۰: محدوده توان راکتیو در سرعت خاص برای مقادیر مشخص گشتاور (۲۰ و ۶۰)



شکل ۳۵-

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۲- ۱۱- الف : حداکثر توان راکتیو در سرعت خاص برای مقدار مشخص گشتاور



شکل ۳۶-

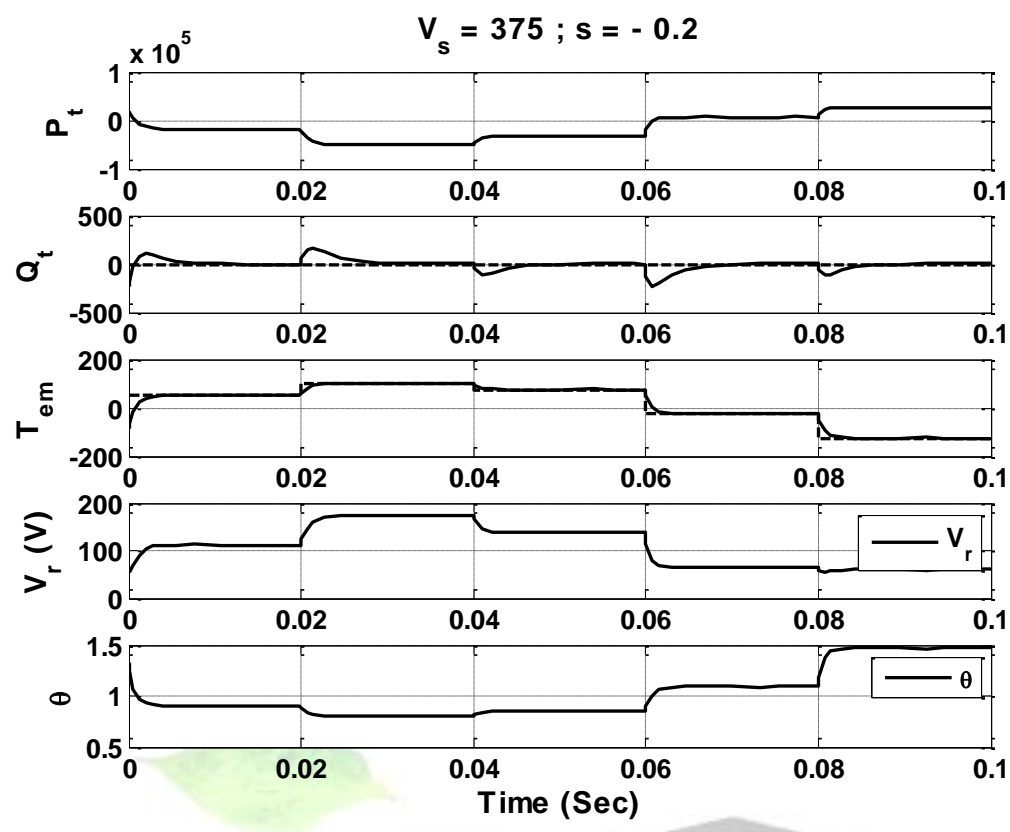
شکل ۲- ۱۱- ب : حداقل توان راکتیو در سرعت خاص برای مقدار مشخص گشتاور

#### ۱-۸-۴-د. خروجی مشخص

در قسمت الف این بخش با دادن ورودی‌های مشخص خروجی‌های ماشین القایی تغذیه دوگانه را در حالت عملکرد دائم مشاهده کردیم. در این قسمت هدف انجام مسیری عکس قبل است. بدین صورت که فرض می‌کنیم خروجی‌های ماشین مانند گشتاور و توان راکتیو در یک سرعت ثابت مشخص است، دامنه و فاز ولتاژ تغذیه رتور را بدست می‌آوریم. **(TemANQt)** البته با توجه به نتایج قسمت ب و ج می‌دانیم که مقادیر گشتاور و توان راکتیو محدود است.

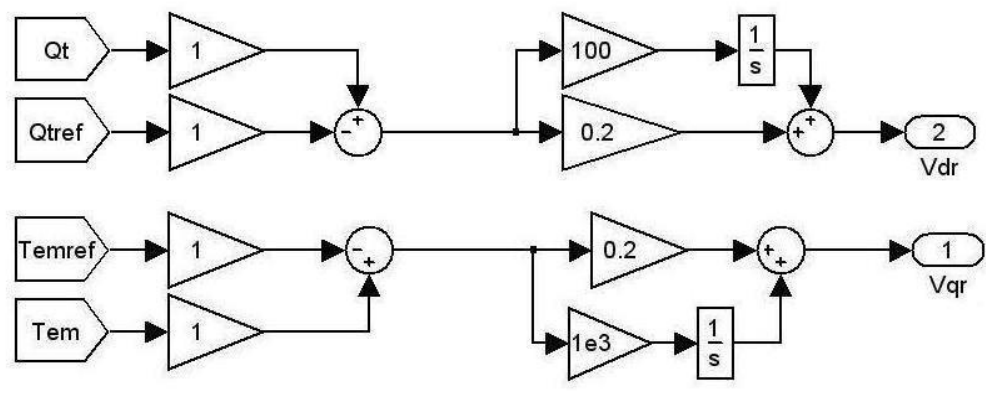
برای انجام این بررسی از مدل **WTDFIGSolve** استفاده شده است. در این مدل از روش حل فیدبک مطابق شکل ۲- ۱۲ استفاده شده است. باید توجه داشت که در این مدل محدودیت‌ها در نظر گرفته نشده است. این محدودیت‌ها روی مقادیر **Qtrf** و **Temref** با توجه به سرعت و ولتاژ استاتور و خود گشتاور مشخص می‌شود. این بررسی به هنگام شبیه‌سازی مدارهای کنترل، لحاظ خواهد شد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳۷-

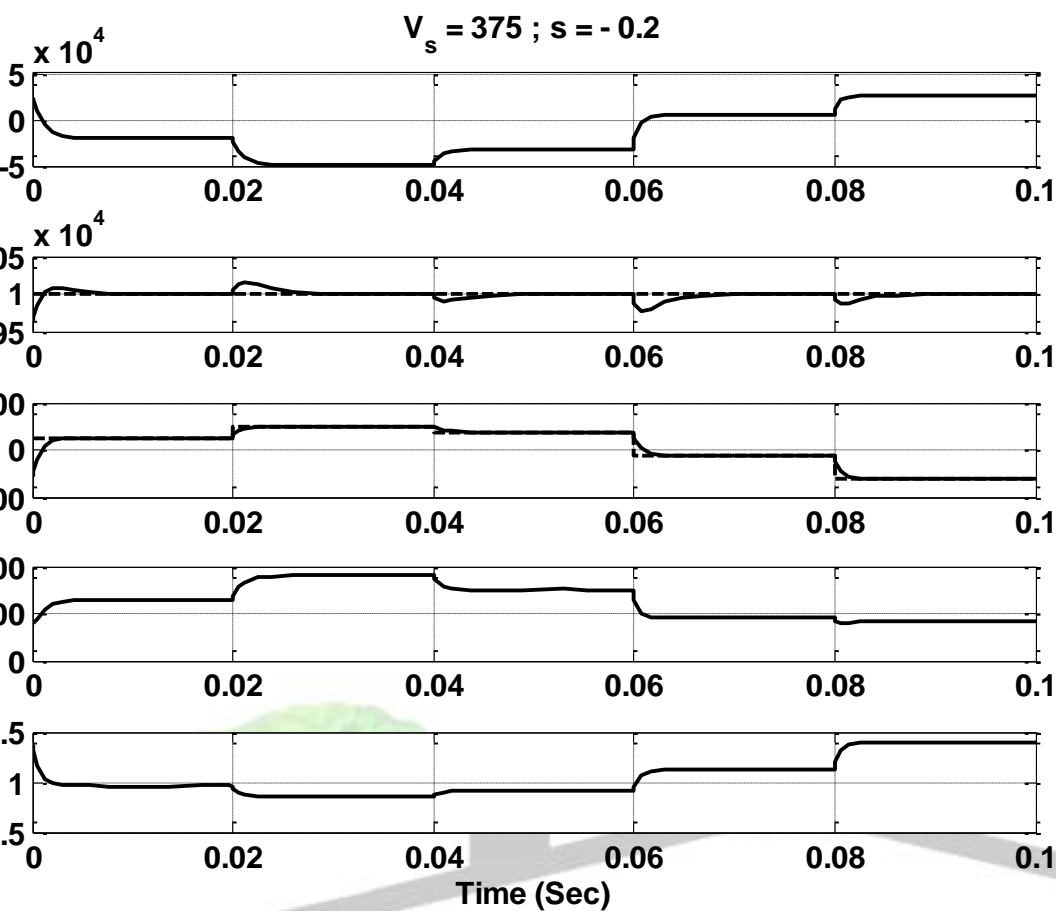
شکل ۲-۱۲: محاسبه دامنه و فاز نسبی ولتاژ رتور برای تأمین گشتاورهای مختلف در حالت توان راکتیو ثابت صفر



شکل ۳۸-

شکل ۲-۱۳-الف: مدار فیدبک برای بدست آوردن مقادیر مناسب دامنه و فاز ولتاژ تغذیه رتور برای تولید گشتاور و توان راکتیو مشخص در یک سرعت ثابت

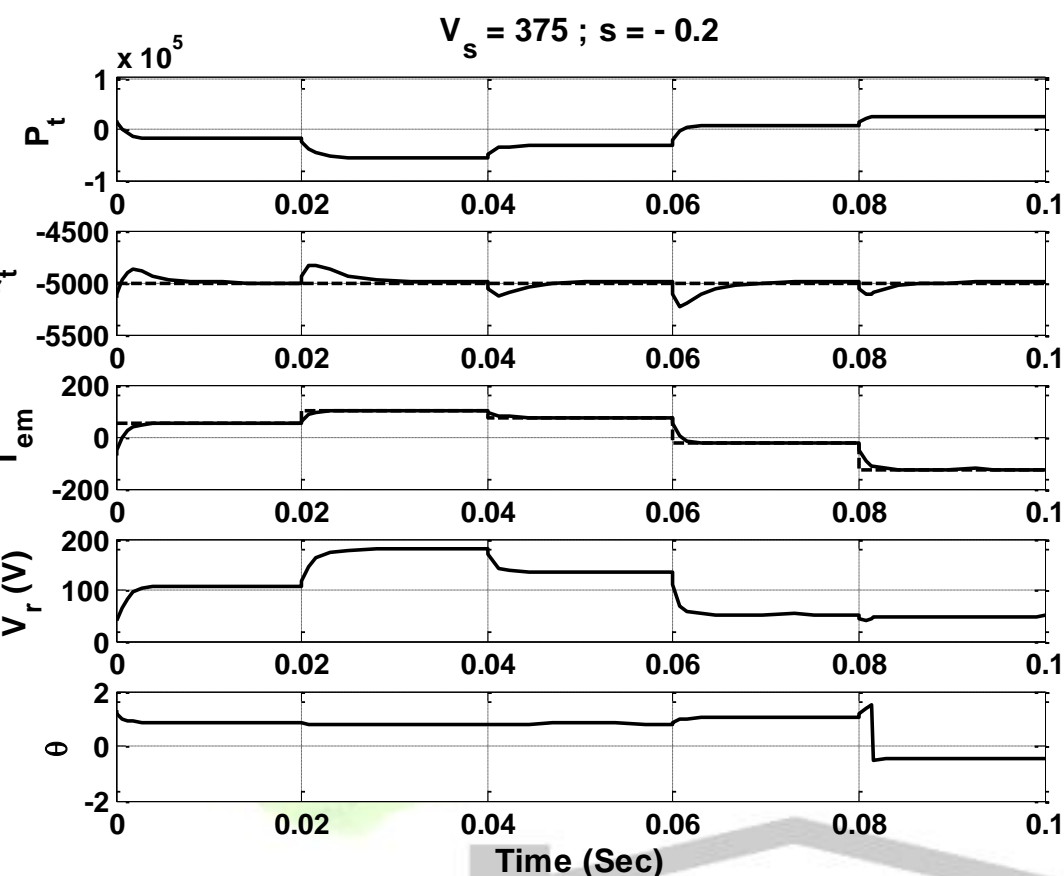
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳۹-

شکل ۲-۱۳-ب: محاسبه دامنه و فاز نسبی ولتاژ رتور برای تأمین گشتاورهای مختلف در حالت تولید توان راکتیو

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۴۰-

شکل ۲-۱۳-ج: محاسبه دامنه و فاز نسبی ولتاژ رتور برای تأمین گشتاورهای مختلف در حالت مصرف توان راکتیو

### ۱-۸-۲-۲-۲ عملکرد دینامیکی

برای مقایسه عملکرد دینامیکی مدل ریاضی با مدل نرم افزار، در دو مرحله اقدام می کنیم. اول مقایسه

رفتار ماشین القایی ساده و سپس تغذیه دوگانه.

### ۱-۸-۲-۱ الف. ماشین القایی ساده

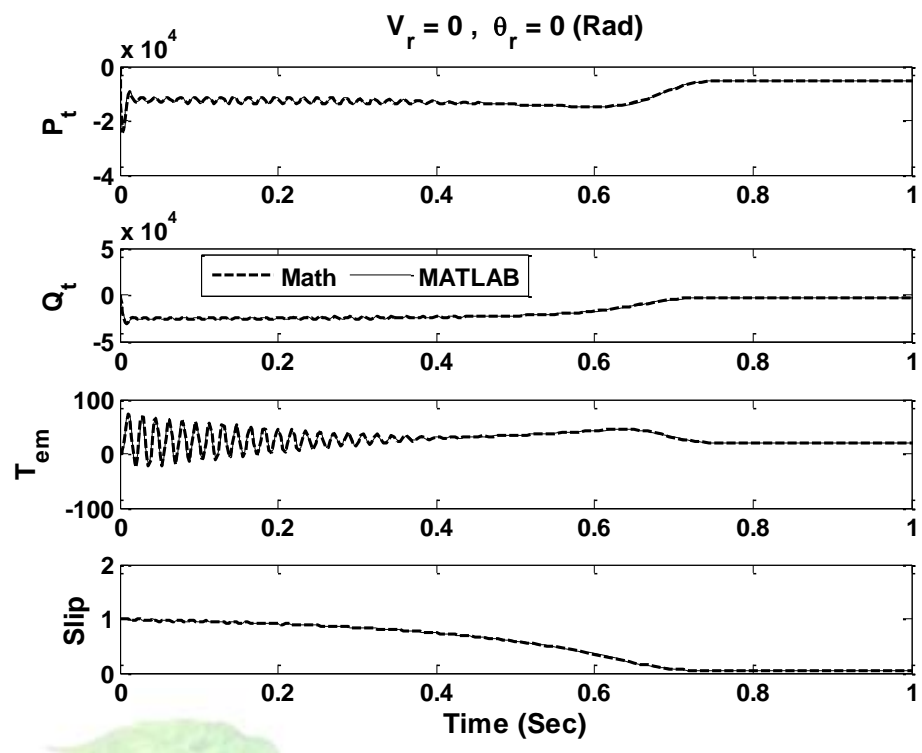
منظور از ماشین القایی ساده عدم وجود تغذیه روی سیم پیچ های رتور است و می توان آنها را

اتصال کوتاه کرد یا ولتاژ اعمالی بین فازهای مختلف را صفر در نظر گرفت. برای این بررسی از مدل های

**MathDynModel** و **MatlabDynModel** استفاده شده است. نتایج در شکل ۲-۱۴ آمده است.

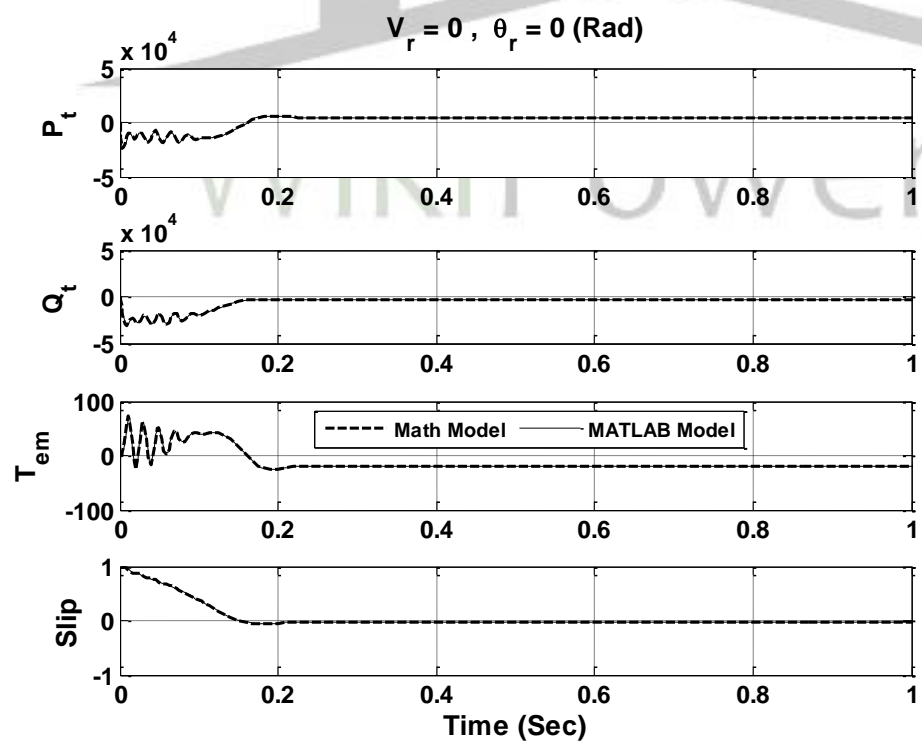
مشاهده می شود که رفتار دو مدل در بالاتر و پایین تر از سرعت سنکرون کاملاً یکسان است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴۱-

شکل ۲- ۱۴- الف: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ریاضی و مدل نرم افزار ماشین القایی ساده برای گشتاور موتوری



شکل ۴۲-

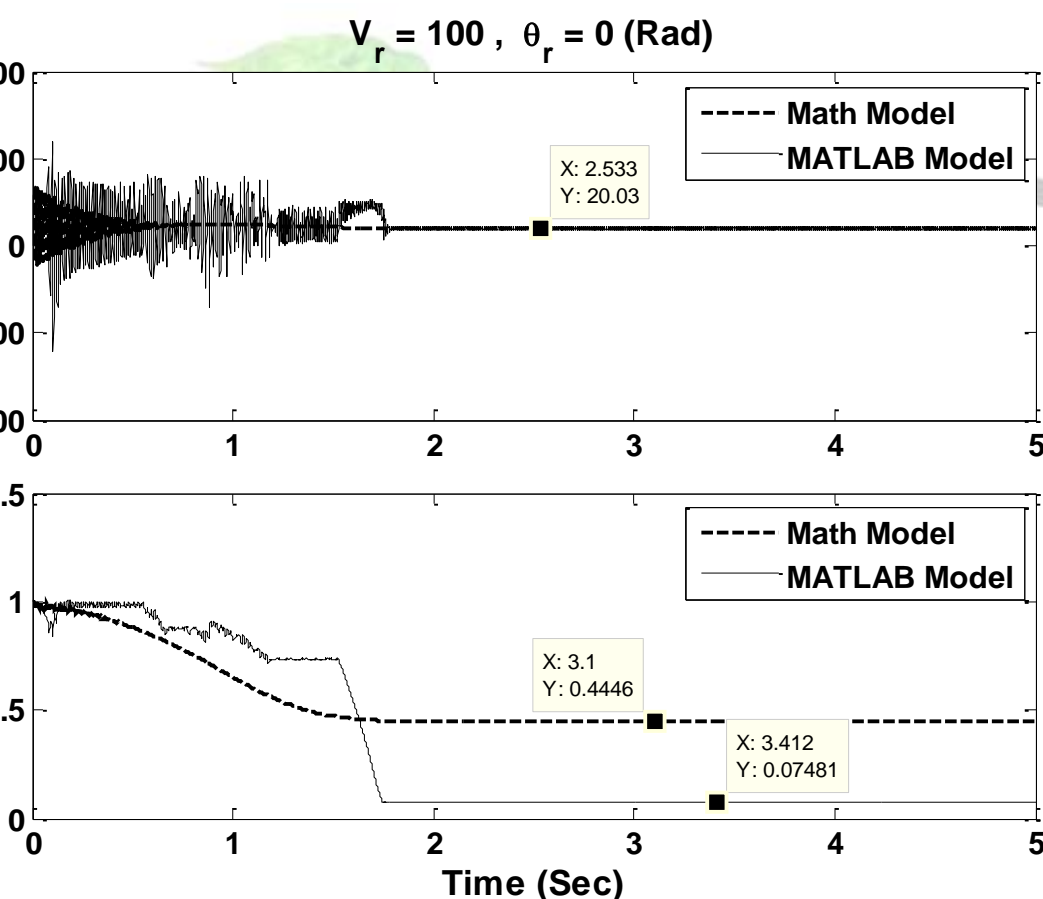
شکل ۲- ۱۴- ب: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ریاضی و مدل نرم افزار ماشین القایی ساده برای گشتاور ژنراتوری



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱-۸-۲-۲-ب. ماشین القایی تغذیه دوگانه

مهمترین ویژگی تغذیه روی رتور، فرکانس آن است که هنگام تحلیل و در عمل باید دقیقاً برابر اختلاف سرعت سنکرون و سرعت (الکتریکی) رتور باشد، در غیر این صورت فرکانس ولتاژ القایی روی رتور با فرکانس ولتاژ تغذیه روی آن برابر نبوده و ماشین عملکرد صحیحی نخواهد داشت. در ادامه ابتدا خواهیم دید که اگر سرعت رتور مدل معمولی ماشین القایی نرم افزار را وارد محاسبات کنیم نتیجه صحیح نخواهد بود. بدین صورت که با اعمال یک گشتاور خاص (مانند حالت القایی ساده) پاسخ مدل نرم افزار متفاوت خواهد بود و اگر همین پاسخ (سرعت حالت دائم) به ورودی آن اعمال شود خروجی گشتاور مقدار قبل نخواهد بود. برای بررسی این مورد همچنان از مدل **MatlabDynModel** استفاده شده است. (استفاده از  $W_{ro}$ )



شکل ۴۳-

شکل ۲-۱۵: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ریاضی و مدل نرم افزار ماشین القایی تغذیه دوگانه با استفاده از سرعت

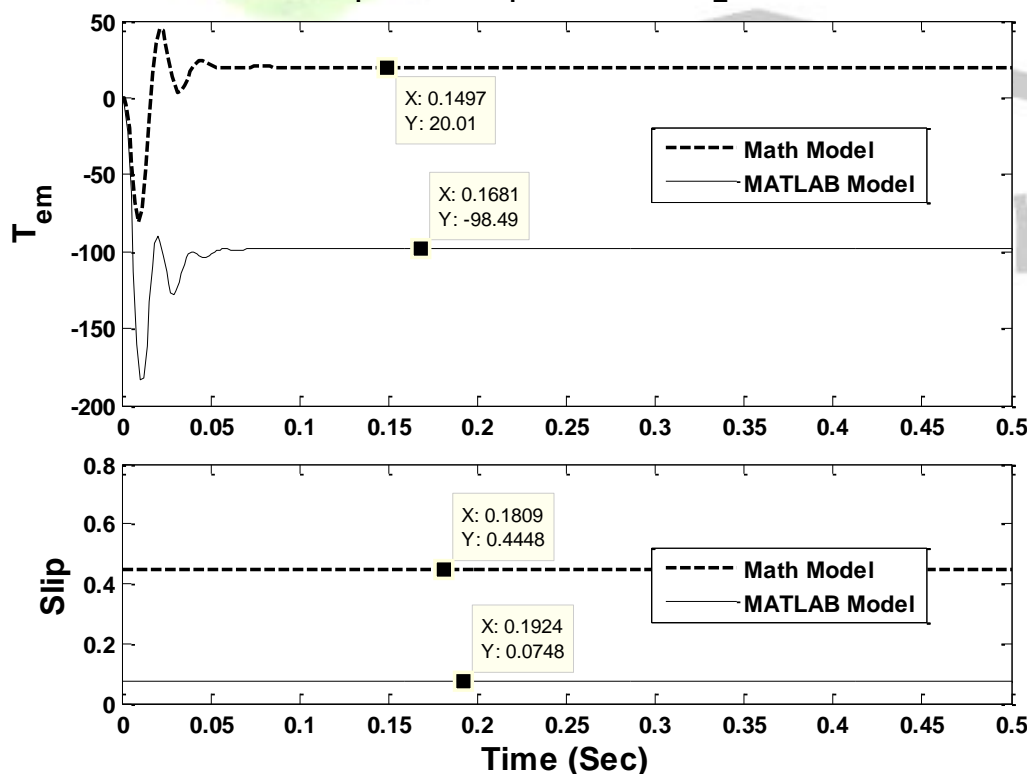
مدل نرم افزار برای ساختن فرکانس تغذیه رتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرمان سایت و به همراه فونت های لازم

در شکل ۲-۱۶ دیده می شود که نتیجه دینامیک و حالت دائم مدل نرم افزار و مدل ریاضی کاملاً متفاوت است. برای آنکه دیده شود آیا مدل نرم افزار درست است یا خیر، مقدار حالت دائم آن را بررسی می کنیم. بدین صورت که خروجی حالت دائم سرعت مدل نرم افزار و مدل ریاضی را به عنوان ورودی به مدل نرم افزار می دهیم و نتایج را مقایسه می کنیم. (از برنامه **DynCompare2** استفاده می کنیم).

همانطور که در شکل ۲-۱۶ دیده می شود، جواب حالت دائم مدل نرم افزار، به سرعت بدست آمده از مدل نرم افزار شکل ۲-۱۵، مطابق گشتاور ورودی نخواهد بود. این بدان معناست که در مدل نرم افزار مشکلی وجود دارد که احتمالاً از عدم تطبیق فرکانس تغذیه رتور با سرعت رتور و سرعت سنکرون است. برای بررسی این موضوع یک مدار دیگر ترتیب می دهیم. ( $W_r$ ) در این مدل سرعت مورد استفاده در ساختن فرکانس تغذیه رتور را از مدل ریاضی بدست آورده و در مدل نرم افزار استفاده می کنیم.

$$V_r = 100, \theta_r = 0 \text{ (Rad)}, T_L = 20$$



شکل ۴۴-

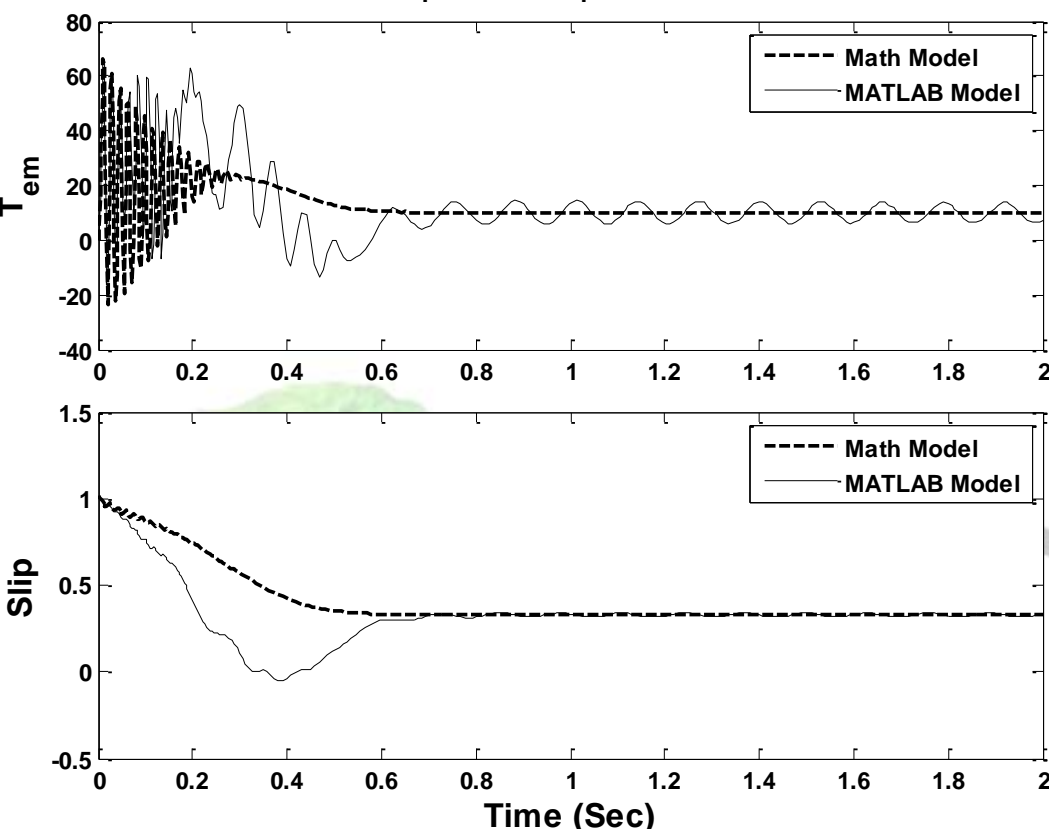
شکل ۲-۱۶: مقایسه پاسخ حالت دائم مدل ریاضی و مدل نرم افزار ماشین القایی تغذیه دوگانه در مورد رفتار دیده

شده در شکل ۲-۱۲

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در شکل ۲-۱۷ دیده می شود که با اصلاح فرکانس تغذیه رتور پاسخ حالت دائم تصحیح می شود ولی پاسخ دینامیک آغازین هنوز با مقدار صحیح فاصله دارد. (مدل نرم افزار در این حالت نمی تواند گشتاور ۲۰ را تولید کند به همین خاطر از گشتاور ۱۰ استفاده شده است. برای رسیدن به حداکثر بیشینه باید از مقادیر جدول ۲-۱ استفاده کرد.)

$$V_r = 100, \theta_r = 0 \text{ (Rad)}$$



شکل ۴۵-

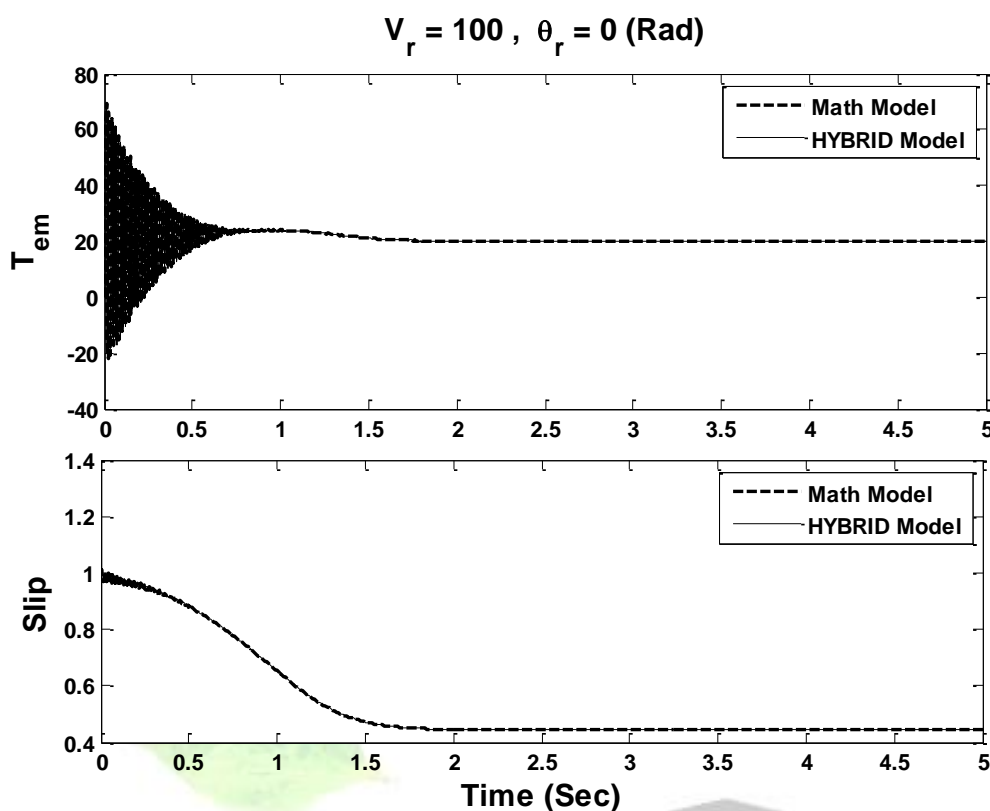
شکل ۲-۱۷: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ریاضی و مدل نرم افزار ماشین القایی تغذیه دوگانه

با استفاده از سرعت مدل ریاضی برای ساختن فرکانس تغذیه رتور

برای اینکه در شبیه سازی های آینده این مشکل دیده نشود مدل ریاضی بدست آمده تبدیل به مدل نرم افزاری واقعی می شود بدین معنی که بتوان از آن در مدارهای قدرت استفاده کرد. این عمل در مدل **MatlabDynModel2** صورت گرفته است. پاسخ دینامیکی این مدل را با مدل ریاضی در شکل ۲-۱۸

مقایسه می کنیم. (برنامه **DynCompare3**)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

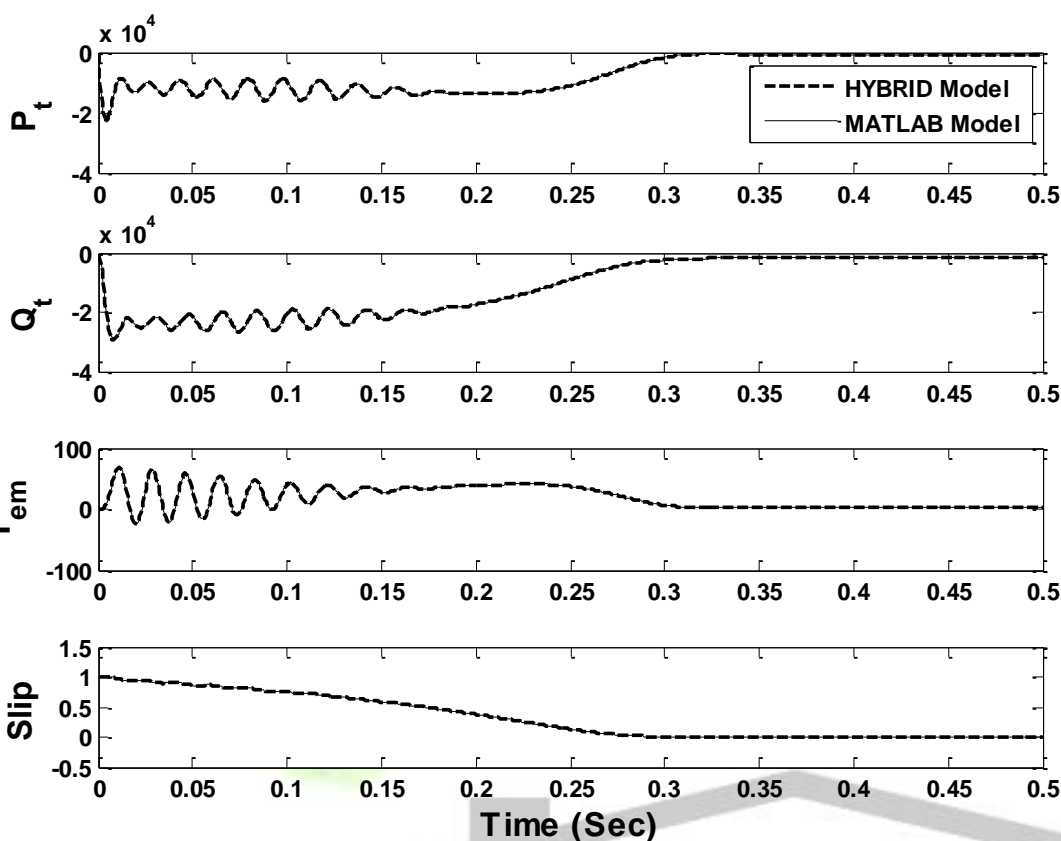


شکل ۴۶-

شکل ۲-۱۸: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ریاضی و مدل ترکیبی ماشین القایی تغذیه دوگانه

حال باید مدل جدید را در مدارهای قدرت نمونه قرار داد تا مشخص شود آیا قابلیت استفاده در شبکه قدرت را نیز دارد یا خیر. برای این منظور مدل **HybridDynModel** و **MatlabDynModel3** طراحی شده است. این دو مدل، شامل یک ماشین القایی ساده هستند که تغذیه یکسان روی استاتور آنها قرار گرفته است. یکی از آنها مدل نرم افزار است و دیگری مدل ریاضی ترکیبی. در شکل ۲-۱۹ دیده می شود که نتایج عملکردی این دو مدل یکسان است. اما در بررسی های بیشتر دیده شد که محدودیت های عملکردی مدل نرم افزار بیشتر است. مثلاً مدل نرم افزار گشتاور ۵ را تولید نمی کند ولی این محدودیت در مدل ریاضی ترکیبی وجود ندارد. البته این به معنای بهتر بودن مدل ریاضی ترکیبی نیست و احتمالاً به خاطر در نظر نگرفتن محدودیت های واقعی ماشین است. اما از آنجا که در شبیه سازی های بعدی محدودیت ها به صورت بیرونی مورد توجه قرار می گیرد می توان از این مدل به جای مدل نرم افزار که در این تحلیل ها به کار نمی آید استفاده کرد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴۷-

شکل ۲-۱۹: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ترکیبی و مدل نرم افزار ماشین القایی

۱-۸-۳-۲-۲-۳. مدل مبنای واحد (PU)

تا به اینجا رفتار ژنراتور القایی تغذیه دوگانه را با تحلیل مدل مقادیر واقعی مورد بررسی قرار داده ایم. پس مدل دینامیکی را با مقادیر واقعی تشکیل داده و نشان دادیم که مدل نرم افزار کاربرد مطلوب را برای انجام تحقیق مورد نظر ندارد و ثابت کردیم که لازم است از مدل ریاضی ارائه شده استفاده شود. در این قسمت مدل دینامیکی ژنراتور القایی به صورت مبنای واحد<sup>۱</sup> را ارائه می کنیم. این مدل کمک می کند تا شبیه سازی با سرعت بسیار بیشتری انجام شود چراکه اعداد نزدیک ۱ هستند و مقادیر بزرگی ندارند، مسأله ای که در بررسی رفتار ژنراتور القایی متصل به توربین بادی با توان نامی ۲ مگاوات با آن روبه رو خواهیم بود. علاوه بر این از آنجا که بیشتر مراجع نتایج کار خود را برای همین نوع ژنراتور و توربین

<sup>۱</sup> Per Unit

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بادی، به صورت مبنای واحد ارائه کرده‌اند لازم است که نتایج این تحقیق نیز در همان مبنا باشد تا امکان مقایسه وجود داشته باشد.

مقادیری که به عنوان مبنای اصلی در نظر گرفته می‌شوند توان نامی ژنراتور، ولتاژ استاتور و سرعت سنکرون می‌باشند. مقادیر مبنای توربین نیز به هنگام شبیه‌سازی کلی، توان نامی توربین برابر توان نامی ژنراتور و سرعت نامی باد است.

با در نظر گرفتن مقادیر مبنای فوق معادلات ماشین به صورت روابط ۲-۲۴ و ۲-۲۵ از روی روابط ۲-۱۳ و ۲-۱۴ بدست می‌آید.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{qs} = -R_s i_{qs} + \lambda_{ds} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \\ v_{ds} = -R_s i_{ds} - \lambda_{qs} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ v_{0s} = -R_s i_{0s} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_{q0}}{dt} \end{array} \right. \quad 2-24$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{qr} = -R_r i_{qr} + (1 - \omega_r) \lambda_{ds} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \\ v_{dr} = -R_r i_{dr} - (1 - \omega_r) \lambda_{qs} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \\ v_{0r} = -R_r i_{0r} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_{q0}}{dt} \end{array} \right.$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qs} \\ -i_{qr} \end{bmatrix} \quad 2-25$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{ds} \\ -i_{dr} \end{bmatrix}$$

معادله دینامیکی سیستم مکانیکی نیز به صورت معادله ۲-۲۶ خواهد بود:

$$T_{em} - T_L = \frac{1}{2H} \frac{d\omega_m}{dt} \quad 2-26$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در رابطه ۲-۲۶ کمیتهای  $H$  و  $\omega_m$  مطابق رابطه ۲-۲۷ می باشند. در این روابط  $\omega_r$  سرعت الکتریکی رتور است و  $P$  تعداد قطبهای ماشین.

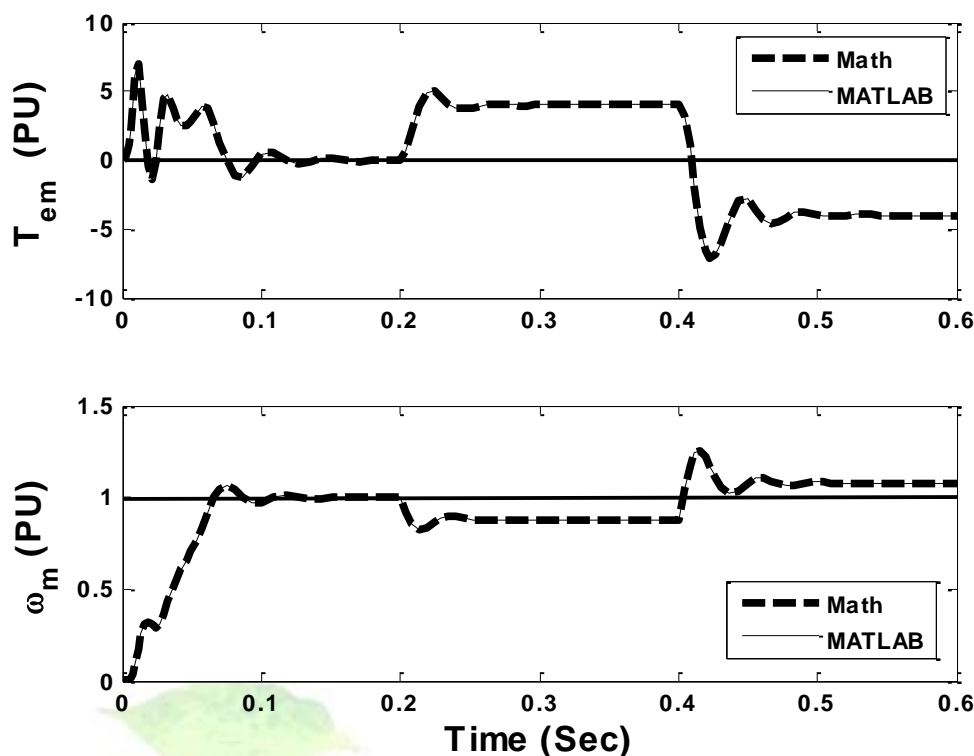
$$\begin{cases} H = \frac{0.5J\omega_{syn}^2}{S_n} \\ \omega_m = \frac{2}{P}\omega_r \end{cases} \quad 27-2$$

از روی این روابط ریاضی مدلی در نرم افزار **MATLAB** ساخته شده (**Dyn\_PU**) که نتایج مقایسه- ای آن با مدل خود نرم افزار، برای ماشین القایی ساده در شکل ۲-۱۹ آمده است. مشخصات ماشین نیز در جدول ۲-۲ آمده است. (اگر دامنه ولتاژ تغذیه رتور صفر قرار داده شود، مدل مانند اتصال کوتاه عمل می کند).

جدول ۲-۲: مشخصات ماشین القایی مورد استفاده در مقایسه مدل مبنای واحد

مقدار PU	کمیت
3730 W	توان نامی
460 V (rms L-L)	ولتاژ استاتور
60 Hz	فرکانس تغذیه استاتور
$R_s=0.01965$	مقاومت استاتور
$R_r=0.01909$	مقاومت رتور
$L_{ls}=0.0397$	اندوکتانس نشتی استاتور
$L_{lr}=0.0397$	اندوکتانس نشتی رتور
$L_m=1.354$	اندوکتانس متقابل
$H=0.09526$	H
$D=0$	D

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۴۸-

شکل ۲-۲۰: مقایسه رفتار دینامیکی مدل ریاضی و مدل نرم افزار ماشین القایی در مبنای واحد

## ۱-۹-۳-۲ روش های کلیدزنی اینورتر

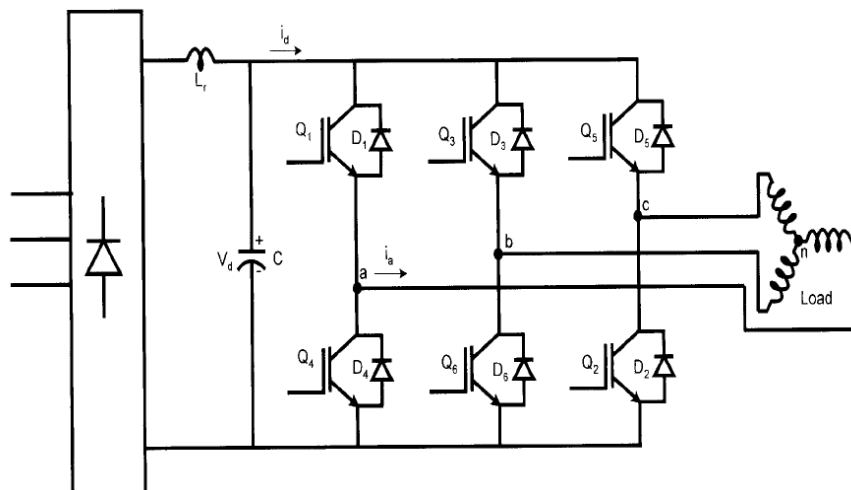
در ساختار ماشین القایی تغذیه دوگانه دو مبدل وجود دارد که یکی به صورت یکسوساز و دیگری در نقش اینورتر عمل می کند. البته می دانیم که ساختار فیزیکی این ادوات یکسان هستند و کلیدزنی آنها تعیین می کند که در کدام ناحیه عملکردی خود کار کنند. بحث روی روش های کلیدزنی برای کاهش تلفات کلیدزنی و بهبود شکل موج توان خروجی، فراوان انجام شده است [۱۴] و هدف این تحقیق نیز بررسی و بهبود این روش ها نیست و تنها قصد دارد روشی را که مناسب ماشین القایی تغذیه دوگانه و روشهای کنترلی آن است انتخاب کند.

اصول کلیدزنی پهنای پالس (PWM) این است که یک دوره تناوب زمانی  $1/T$  را که معادل یک گردش فاز کامل برای ولتاژ مطلوب خروجی است به تعدادی بازه کوچکتر تقسیم می کند. سپس در هر کدام از این بازه ها مقدار ولتاژ مطلوب روی ۳ پایانه خروجی را ثابت فرض کرده و سعی می کند همان را



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با تعیین موقعیت کلیدها تولید کند. ترتیب قابل اعمال کلیدهای یک اینورتر ۳ فاز ۶ کلیده (شکل ۲-۲۱) و ولتاژ تولیدی متناظر با آن در جدول ۲-۳ و شکل ۲-۲۱ آمده است.



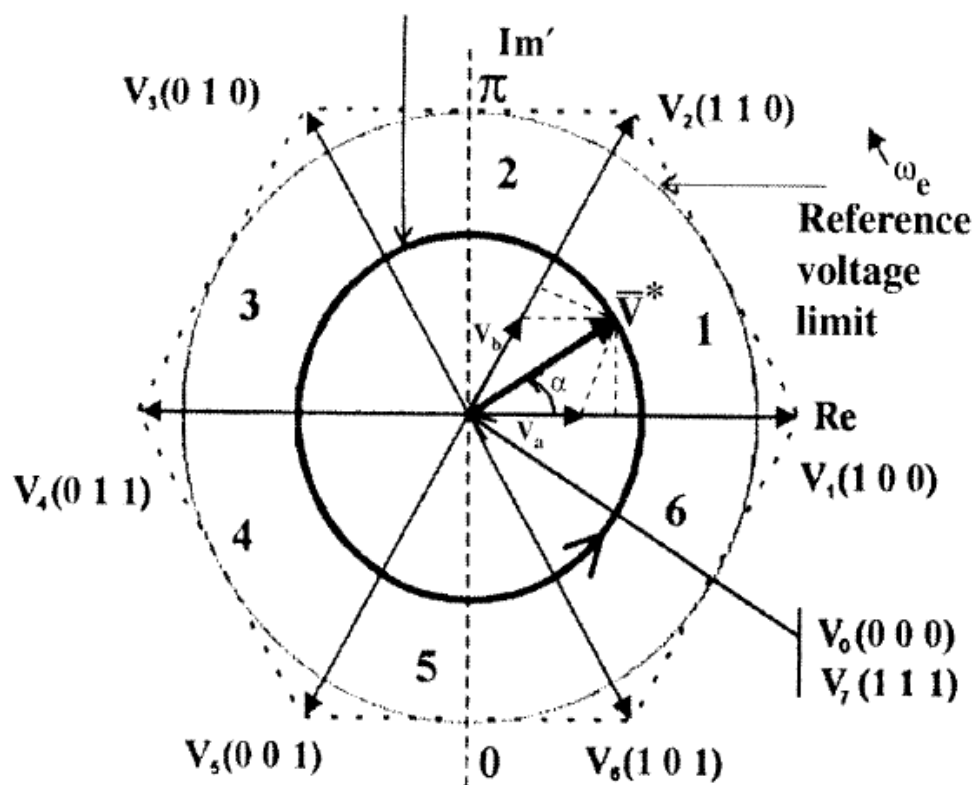
شکل ۴۹-

شکل ۲-۲۱: اینورتر ۳ فاز ۶ کلیده

جدول ۲-۳: موقعیتهای کلیدهای اینورتر ۳ فاز و ولتاژ متناظر تولیدی

State	On devices	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	Space voltage vector
0	$Q_4Q_6Q_2$	0	0	0	$\bar{V}_0(000)$
1	$Q_1Q_6Q_2$	$2V_d/3$	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$\bar{V}_1(100)$
2	$Q_1Q_3Q_2$	$V_d/3$	$V_d/3$	$-2V_d/3$	$\bar{V}_2(110)$
3	$Q_4Q_3Q_2$	.	.	.	$\bar{V}_3(010)$
4	$Q_4Q_3Q_5$	.	.	.	$\bar{V}_4(011)$
5	$Q_4Q_6Q_5$	.	.	.	$\bar{V}_5(001)$
6	$Q_1Q_6Q_5$	.	.	.	$\bar{V}_6(101)$
7	$Q_1Q_3Q_5$	0	0	0	$\bar{V}_7(111)$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۵۰-

شکل ۲-۲۲: موقعیت مکانی ولتاژهای تولیدی در موقعیتهای ۸ گانه اینورتر ۳ فاز روی محورهای DQ

با این ایده چند سؤال مطرح می شود:

۱. طول بازه های کلیدزنی (تغییر موقعیت کلیدها) چگونه تعیین شود تا هم شکل موج مطلوب باشد، هم تلفات کلیدزنی از حد مجاز بیشتر نشود؟

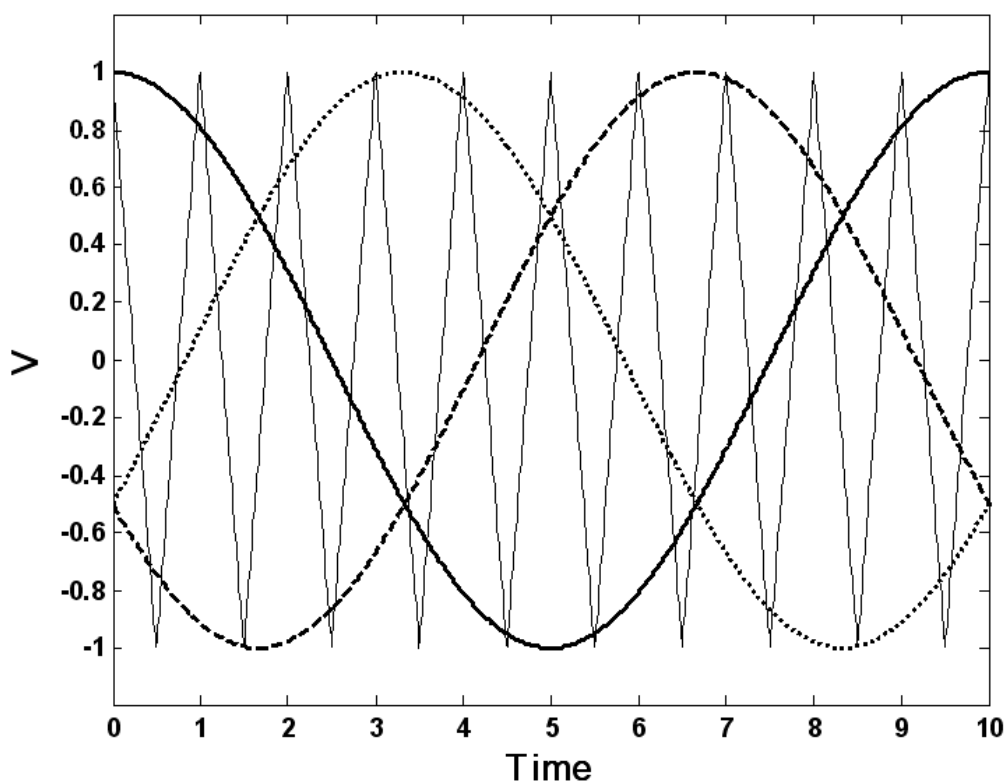
۲. در هر بازه کلیدزنی، کدام موقعیت کلیدها انتخاب شود؟

با توجه به سؤال ۲، دو نوع روش انتخاب موقعیت کلیدها پیشنهاد شده است: ۱. مقایسه موج سینوسی با موج دندان اره ای، ۲. استفاده از مدولاسیون بردارهای فضایی. البته روش های دیگری نیز مطرح است مانند: روش حذف هارمونیک، روش جریان با کمترین نوسان، روش کنترل تطبیقی جریان. در ادامه مختصراً دو روش پینهادی را شرح داده و در انتها مدل مناسب برای استفاده در این تحقیق را مشخص می کنیم.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

### ۱-۹-۱ - ۲-۳-۱. روش کلیدزنی SPWM [۱۵]

در این روش شکل موج مطلوب در هر فاز با یک موج دندان اره‌ای (موج حامل) مقایسه می‌شود. (شکل ۲-۲۳) هر کجا موج مطلوب مقدار بیشتر از موج حامل داشت کلید بالای ساق مربوط به آن فاز وصل می‌شود و کلید پایین قطع و هر کجا مقدار موج مطلوب کمتر بود عمل عکس انجام می‌گیرد. (شکل ۲-۲۴)



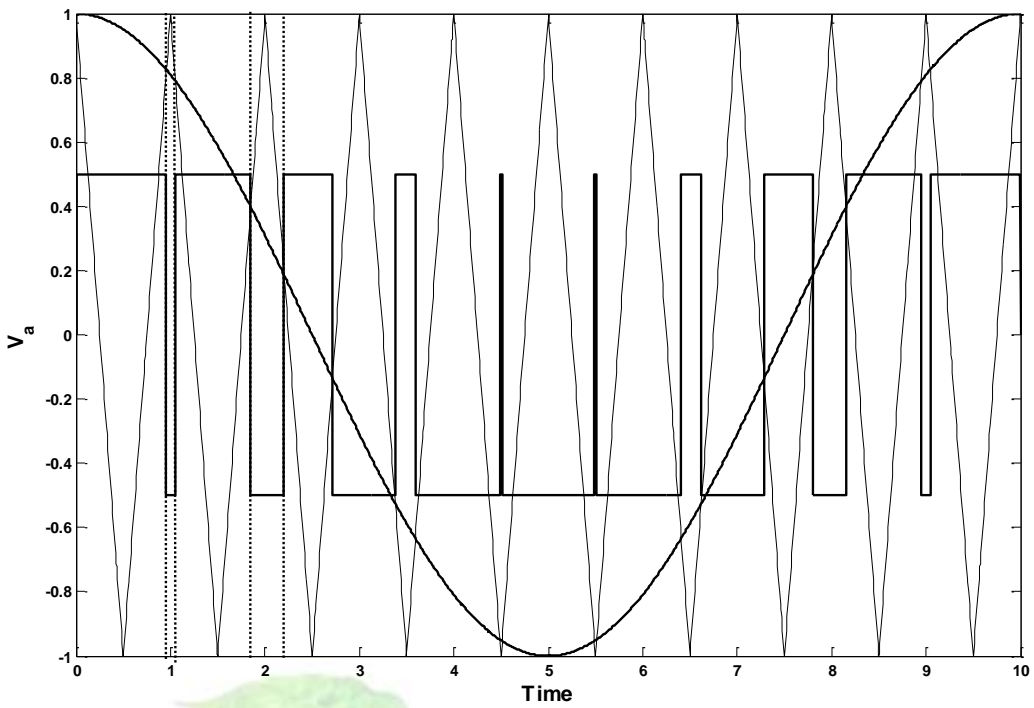
شکل ۵۱-

شکل ۲-۲۳: شکل موج‌های مطلوب و موج حامل دندان اره‌ای

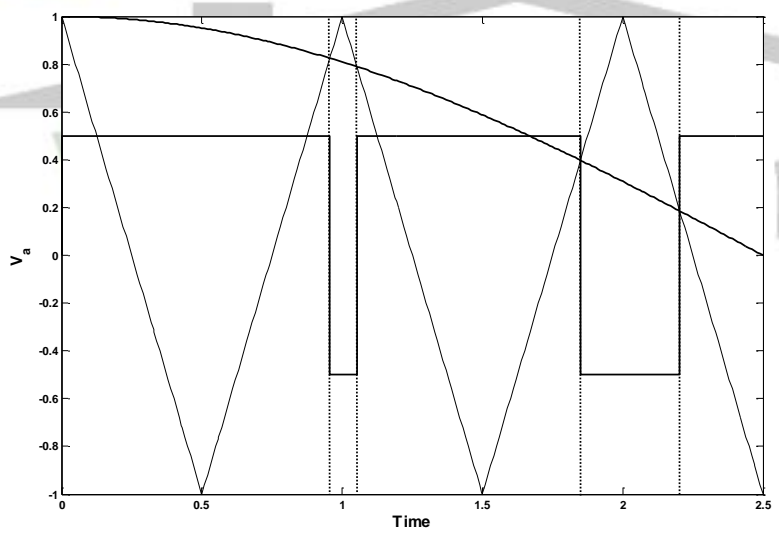
همزمان دو فاز دیگر نیز به همین روش کلیدزنی می‌شوند. در شکل ۲-۲۴ موقعیت سه کلید بالا همزمان با توجه به موج‌های مطلوب و موج حامل نشان داده شده است. در این روش کلیدزنی فاز نسبی ولتاژ سه فاز نسبت به یک مبنای دیگر نیز قابل کنترل است. در ضمن اگر دامنه موج حامل تغییر کند دامنه ولتاژ خروجی نیز تغییر خواهد کرد. اگر نسبت دامنه موج مطلوب به موج حامل  $m$  باشد دامنه ولتاژ خروجی از رابطه ۲-۲۸ بدست می‌آید:

$$V_m = 0.5mV_{dc} \quad 2-28$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



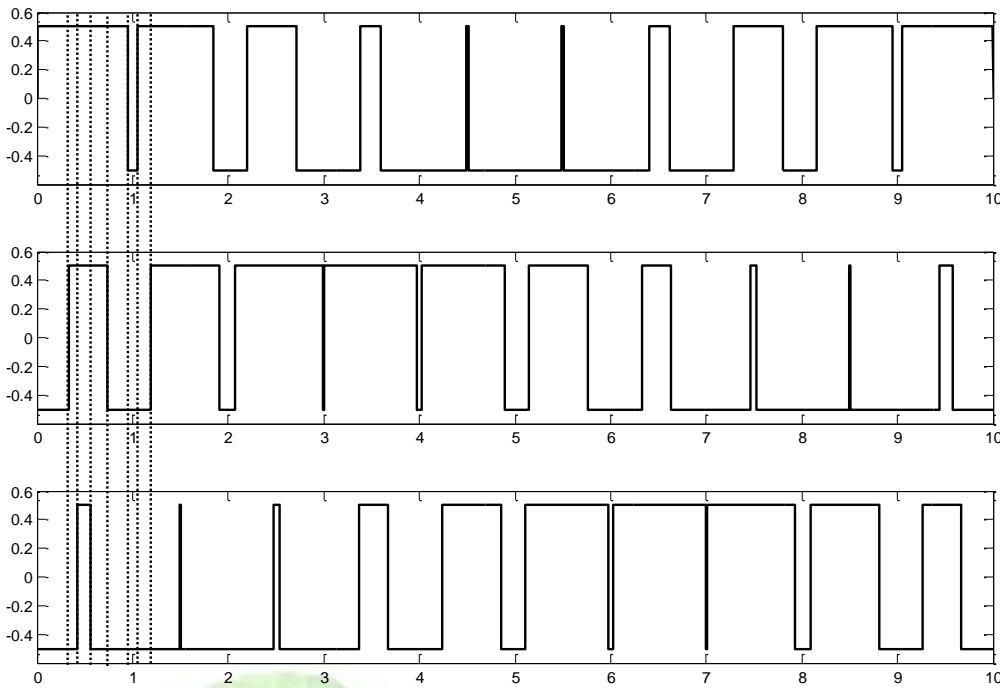
شکل ۵۲-



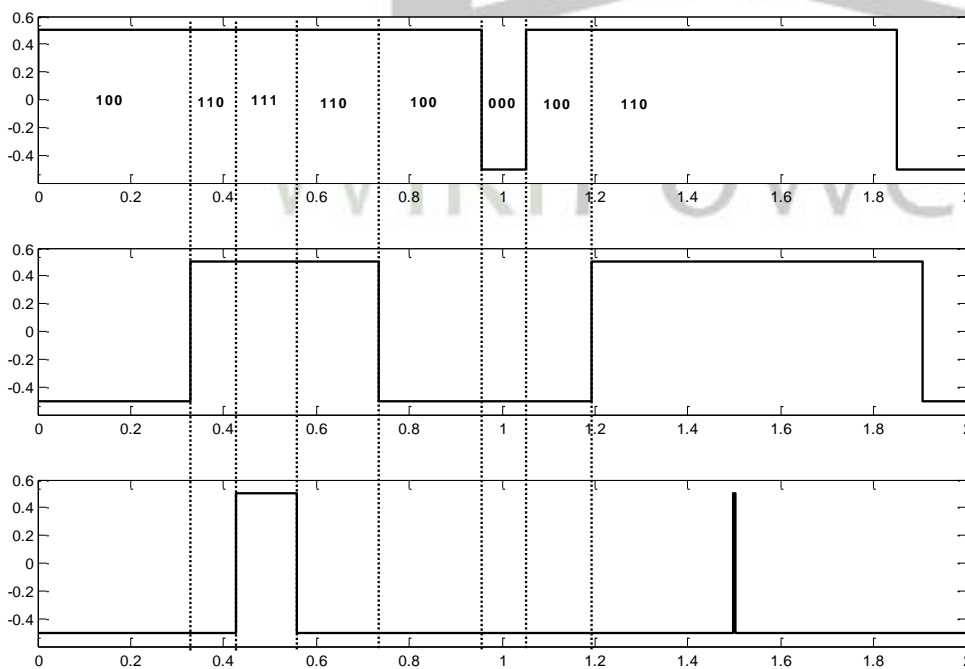
شکل ۵۳-

شکل ۲- ۲۴: تعیین موقعیت کلیدهای یک ساق اینورتر به روش SPWM

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۵۴-



شکل ۵۵-

شکل ۲- ۲۵: موقعیت کلیدهای بالایی اینورتر به روش SPWM

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

### ۱-۹-۲-۲-۳-۲. روش کلیدزنی SVM

روش SVM روش دیگری برای انتخاب وضعیت کلیدها در هر بازه زمانی کلیدزنی برای تولید ولتاژهایی است که در آن بازه مطلوب است روی پایانه‌های خروجی اینورتر قرار بگیرد. این روش به جای آنکه در همان حوزه سه فاز به انتخاب موقعیت کلیدها با ابزار غیر مستقیم (مانند موج حامل دندان‌اره‌ای) استفاده کند، با به‌کارگیری تبدیل پارک در یک فضای دو بعدی این تصمیم‌گیری را به صورت مستقیم انجام می‌دهد. بدین صورت که معادل ۸ موقعیت کلیدها را در فضای پارک بدست آورده (جدول ۲-۳) سپس سه فاز مطلوب را نیز به فضای پارک می‌برد. در این فضا دو موقعیتی را که بردار مطلوب را ایجاد می‌کنند و درصد مورد نیاز هر کدام مشخص می‌شود. سپس در یک بازه زمانی با توجه به درصد بدست آمده دو بار کلیدزنی انجام می‌شود و بردار مورد نظر ساخته می‌شود. علت اصلی کارآمدی این روش این است که سه فاز متعادل از یکدیگر مستقل نیستند و در اصل دو کمیت مستقل هستند که می‌توان آنها را به صورت یک بردار با دامنه و فاز متغیر نشان داد. جزئیات این روش در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. تبدیل پارک نیز مطابق رابطه ۲-۲۹ است.

$$\begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} \quad 2-29$$

### ۱-۹-۳-۲-۳-۳. مدل کلیدزنی انتخابی

هر دو روش فوق قابل اجراست اما اگر به سرعت پاسخ مبدل و اینرسی مجموعه مورد بررسی (توربین ژنراتور بادی با توان نامی ۲ مگاوات) توجه کنیم ملاحظه می‌شود که هر دو روش فوق را می‌توان تنها با یک بهره مدل کرد. این انتخاب توسط مراجع نیز پیشنهاد شده است. [۱۴] پس مدل نهایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد را مانند روش کلیدزنی SPWM مدل می‌کنیم که یک ضریب است.

البته مسأله دیگری نیز ما را به این کار مجبور می‌کند و آن این است که برای شبیه سازی توسط مدل ریاضی لازم است ورودی‌ها به صورت کمیت‌های عددی باشند پس باید موج‌های توانی و قدرت به سیگنال تبدیل شوند. این مستلزم آن است که حداقل یک سیکل زمانی تأخیر در تحلیل داشته باشیم در

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

صورتیکه که در واقعیت چنین نیست و مدارهای واقعی بدون تأخیر ولتاژها و جریان‌ها را دریافت می‌کنند. پس اگر قرار باشد از مدل واقعی کلیدزنی استفاده شود یک سیکل تأخیر غیرضروری وارد تحلیل‌ها می‌شود. این مسأله در مورد تغذیه رتور که فرکانس کمتری دارد خطای بیشتری را ایجاد می‌کند. پس از آنجا که هدف این تحقیق بررسی اثرات کلیدزنی مبدل‌های الکترونیک قدرت نیست و پاسخ این مدارات نیز در مقایسه با اجزاء مکانیکی سیستم بسیار پایین است می‌توان و چه بسا باید از رفتار دینامیکی آنها صرف‌نظر کرد تا پاسخ مناسبی بدست آید.

نکته دیگری که این انتخاب را تأیید و تقویت می‌کند، استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور است که در آن لزوماً نیازی به اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی مربوط به مبدل‌ها وجود ندارد. این موضوع در فصل آتی بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.



### فصل سوم : کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین باد

در فصل اول با نیروگاه بادی به خصوص توربین باد و منحنی‌های عملکرد آن آشنا شدیم. در فصل دوم ماشین‌های القایی تغذیه دوگانه را به تفصیل مورد بررسی قرار داده، منحنی‌های عملکرد آن نیز تشریح گردید. در این فصل این دو را به هم متصل کرده و سیستم کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه را هنگام اتصال به توربین باد برای جذب حداکثر توان و پرهیز از شرایط نامطلوب عملکردی طراحی و شبیه‌سازی خواهیم کرد. سیستم کنترلی مورد نظر مطابق روش کنترل مستقیم گشتاور طراحی شده است. کنترل‌کننده‌ها نیز ابتدا کنترل‌کننده‌های تناسبی - انتگرالی (PI) و در انتها کنترل‌کننده فازی با یکدیگر مقایسه می‌شود.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

روش ها و اصول کنترل ماشین های جریان متناوب ذیل عنوان روش های کنترل اسکالر و برداری در پیوست ۱ بررسی شده است. در پیوست ۲ نیز اصول منطق و کنترل فازی مختصراً مرور شده است.

### ۱-۱۰ - ۱-۳ طراحی سیستم کنترل WDFI G به روش کنترل مستقیم گشتاور

توربین بادی با روابط ۱-۲۱ تا ۱-۲۳ در فصل اول مشخص شد. استراتژی کنترل آن نیز در شکل ۱-۱۷ و شکل ۱-۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. در فصل ۲ نیز ماشین القایی تغذیه دوگانه به صورت مبسوط تحلیل شد و منحنی های عملکردی آن به دقت ارائه شد. در دو قسمت ابتدایی این فصل نیز روش های کنترل اسکالر و برداری ماشین های القایی مرور گردید و نشان داده شد که روش کنترل مستقیم گشتاور برای کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین بادی از دیگر روش ها بهتر و ساده تر است. در این قسمت این روش کنترلی روی یک نمونه عددی شبیه سازی می شود. مشخصات این سیستم توربین - ژنراتور بادی در

جدول ۱-۳ و جدول ۲-۳ آمده است. مقدار  $H$  مطابق رابطه ۲-۲۷ برای کل سیستم از رابطه ۳-۱ بدست می آید. ضریب اصطکاک  $D$  نیز برای کل مجموعه صفر در نظر گرفته شده است.

$$H = \frac{0.5J\omega_{syn}^2}{S_n} = \frac{0.5 \times 6 \times 10^6 \times \left(0.01 \times \frac{120 \times 60}{6} \times \frac{2\pi}{60}\right)^2}{2 \times 10^6} = 2.37 \text{ s} \quad 1-3$$

جدول ۱-۳ : مشخصات ماشین القایی

مقدار PU	کمیت
2 MW	توان نامی
690 V (rms L-L)	ولتاژ استاتور
60 Hz	فرکانس تغذیه استاتور
$R_s=0.01$	مقاومت استاتور
$R_r=0.01$	مقاومت رتور
$L_{ls}=0.1$	اندوکتانس نشی استاتور
$L_{lr}=0.08$	اندوکتانس نشی رتور
$L_m=3$	اندوکتانس متقابل
$P=6$	تعداد قطب

جدول ۲-۳ : مشخصات توربین باد [۷]

مقدار	کمیت
-------	------

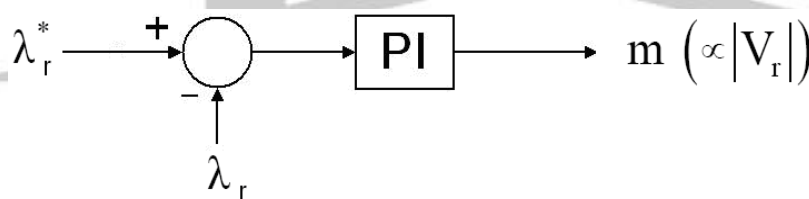


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

توان نامی	2 MW
سرعت نامی باد	10 m/s
قطر پره ها	75 m
سرعت قطع پایین	3 m/s
سرعت قطع بالا	15 m/s
نسبت تبدیل جعبه دنده	1:100
اینرسی کل	$6 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2$
محدوده زاویه پره ها [°]	0 - +30 Deg
نرخ تغییر زاویه پره ها [°/s]	-5 - +10 Deg/s

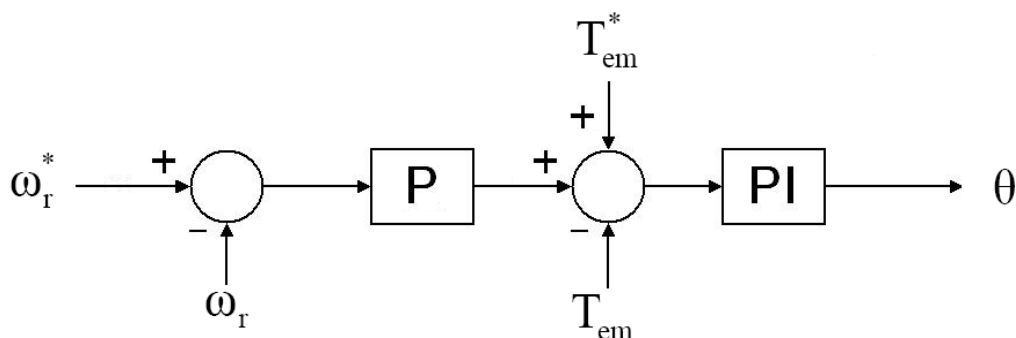
حلقه های کنترلی در این سیستم کنترل مطابق شکل ۳-۱ تا شکل ۳-۳ و مقادیر مرجع آن مطابق

رابطه ۳-۲ تا ۳-۶ است.



شکل ۵۶-

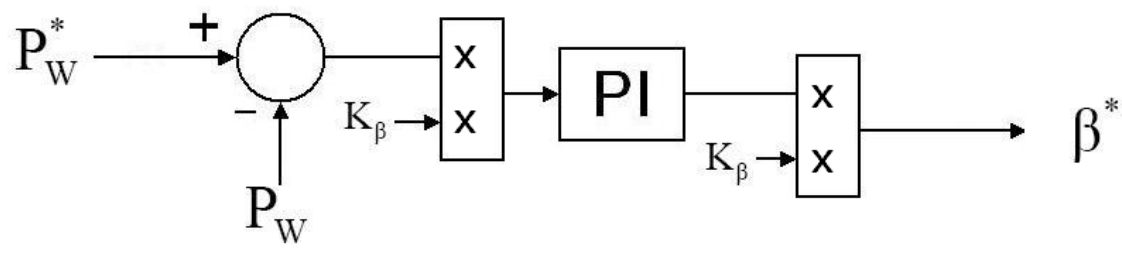
شکل ۳-۱: حلقه کنترل شار



شکل ۵۷-

شکل ۳-۲: حلقه کنترل سرعت و گشتاور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۵۸-

شکل ۳-۳: حلقه کنترل زاویه پره های توربین

$$\lambda^* = 1 \quad ۲-۳$$

$$\omega_r^* = \begin{cases} \frac{2}{3} & V_W \leq V_{Wmin} \\ \frac{2}{3} \left( \frac{V_W}{V_{WN}} \right) & V_{Wmin} \leq V_W \leq V_{Wmax} \\ \frac{4}{3} & V_{Wmax} \leq V_W \end{cases} \quad ۳-۳$$

$$T_{em}^* = \begin{cases} 0 & V_W \leq V_{Wmin} \\ \left( \frac{V_W}{V_{WN}} \right)^2 & V_{Wmin} \leq V_W \leq V_{Wmax} \\ 1 & V_{Wmax} \leq V_W \end{cases} \quad ۴-۳$$

$$P_W^* = \begin{cases} 0 & V_W \leq V_{Wmin} \\ \left( \frac{V_W}{V_{WN}} \right) & V_{Wmin} \leq V_W \leq V_{Wmax} \\ 1 & V_{Wmax} \leq V_W \end{cases} \quad ۵-۳$$

$$K_\beta = \begin{cases} Var & V_W \leq V_{Wmin} \\ 0 & V_{Wmin} \leq V_W \leq V_{Wmax} \\ Var & V_{Wmax} \leq V_W \end{cases} \quad ۶-۳$$

شکل ۳-۱ حلقه کنترل شار رتور است. پیش از این توضیح دادیم که کنترل شار و تنظیم آن در حداکثر مقدار ممکن آن مستقیماً بر افزایش سرعت پاسخ گشتاور اثر دارد پس وجود این حلقه کنترل ضروری است. از طرف دیگر به جهت تغییر تغذیه رتور، شار استاتور چندان تغییر نخواهد کرد به همین

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

خاطر کنترل شار رتور اولویت دارد. میزان مطلوب شار در واحد مبنا ۱ پریونیت است (رابطه ۳-۲) و در این سیستم توسط کنترل دامنه ولتاژ تغذیه رتور کنترل می شود.

شکل ۳-۲ حلقه کنترل سرعت - گشتاور است. با افزودن حلقه کنترل سرعت پاسخ سیستم کنترلی افزایش یافته و اطمینان عملکرد آن نیز تضمین می شود. در این حلقه کنترلی استفاده از کنترل کننده انتگرالی مناسب بعلت تضعیف پاسخ گذرا مناسب نیست. در ضمن به خطا با وجود انتگرالگیر حلقه کنترل شگتاور قطعاً صفر خواهد شد پس نیازی هم به استفاده از انتگرالگیر در حلقه کنترل نیست. مقادیر فرمان سرعت و گشتاور نیز مطابق سناریوی کنترل توضیح داده شده در قسمت ۱-۴-۳ و شکل ۱-۱۷ و شکل ۱-۱۸ تنظیم می شوند. این سناریوی کنترل در روابط ۳-۳ و ۳-۴ به صورت عملیاتی آورده شده است.

شکل ۳-۳ حلقه کنترل زاویه پره ها است. در سناریوی کنترل انتخابی، زاویه پره ها سه ناحیه مختلف را دارند. ابتدا ناحیه ای که به آن ناحیه حداکثر توان گفته می شود و سرعت وزش باد بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی است. در این محدوده مطلوب آن است که زاویه پره ها صفر باشد تا بیشترین توان از باد جذب شود. در این محدوده میزان سیگنال فرمان توان نیز متناسب با سرعت وزش باد بر حسب پریونیت است. ناحیه عملکردی دوم، سرعت های پایین تر از سرعت قطع پایین است. پیش از این نیز توضیح دادیم که به علت راه اندازی بسیار بدرفتار ماشین القایی بهتر است که وقتی سرعت باد از سرعت قطع پایین کمتر می شود برای مدتی (مثلاً چند دقیقه) توربین همچنان در سرعت حداقل گردش کند و اگر بعد از این مدت باز هم سرعت باد کافی نبود توربین متوقف شود. در این زمان میانی لازم است که گشتاوری به توربین وارد نشود به همین علت زاویه پره ها باید به گونه ای تغییر کند که توان قابل جذب از باد صفر شود.

اما در بالاتر از سرعت نامی، مفصلاً بحث کردیم که مطلوب ثابت ماندن سرعت دوران و گشتاور الکترومغناطیسی است. اما برای آنکه این امر ممکن شود لازم است که زاویه پره ها افزایش یابد تا توان قابل جذب از باد با افزایش سرعت باد و ثابت ماندن سرعت دوران توربین ثابت بماند. در این حالت فرمان توان مقدار ۱ پریونیت دارد. روابط عملیاتی این حلقه کنترلی در روابط ۳-۵ و ۳-۶ آمده است.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

آنچه در مورد کنترل زاویه پره‌ها اهمیت و تازگی دارد، در نظر گرفتن محدودیت تغییرات زاویه و همچنین محدودیت سرعت تغییرات زاویه پره‌هاست که در این تحقیق لحاظ شده است. (شکل ۱- ۲۱)

### ۱-۱-۲-۳. نتایج شبیه سازی با کنترل کننده PI

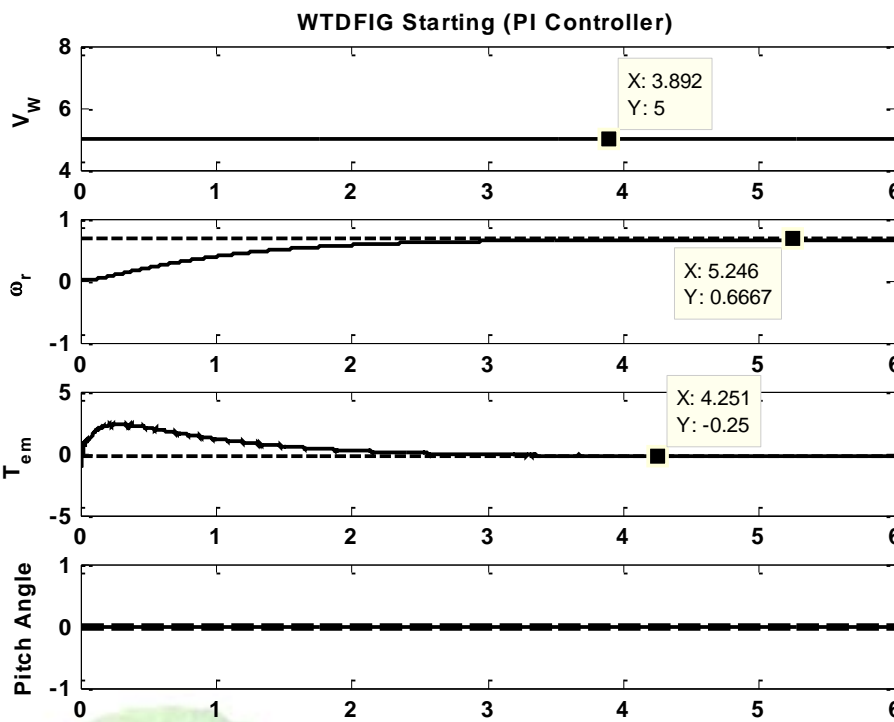
مدارهای کنترل مطابق آنچه در قسمت پیشین ارائه شد، بسته می‌شوند و تمام کنترل‌کننده‌ها تناسبی - انتگرالی ساده هستند. آنچه در این شبیه‌سازی وجود دارد و مقایسه آن را با دیگر شبیه‌سازی‌ها ناممکن می‌سازد در نظر گرفتن حد سرعت تغییرات زاویه پره‌هاست. در این شبیه‌سازی حد افزایش ۱۰ درجه بر ثانیه و حد کاهش ۵ درجه بر ثانیه لحاظ شده است [۸] که علاوه بر کند کردن پاسخ محدودیت‌هایی را نیز برای تنظیم کنترل‌کننده‌های حلقه کنترل سرعت - گشتاور ایجاد می‌کند.

برای بررسی عملکرد سیستم کنترلی دو حالت راه‌اندازی و تغییرات عادی مورد نظر است. ابتدا راه‌اندازی را بررسی کرده و سپس به بررسی تغییرات می‌پردازیم. لازم به تذکر است که به علت تفاوت بسیار شدید رفتار سیستم در این دو عملکردی لازم است که دو سری ضرایب کنترلی لحاظ شود. بدین صورت که اگر سیستم کنترلی را ابتدا برای بهترین پاسخ راه‌اندازی تنظیم کنیم برای دنبال کردن تغییرات اصلاً پاسخگو نیست و بسیار کند خواهد بود. پس ابتدا بهترین پاسخ راه‌اندازی را بررسی می‌کنیم. سپس مقادیر مطلوب برای کنترل تغییرات عادی را بدست می‌آوریم. سپس با مقادیر دوم پاسخ راه‌اندازی را بررسی می‌کنیم.

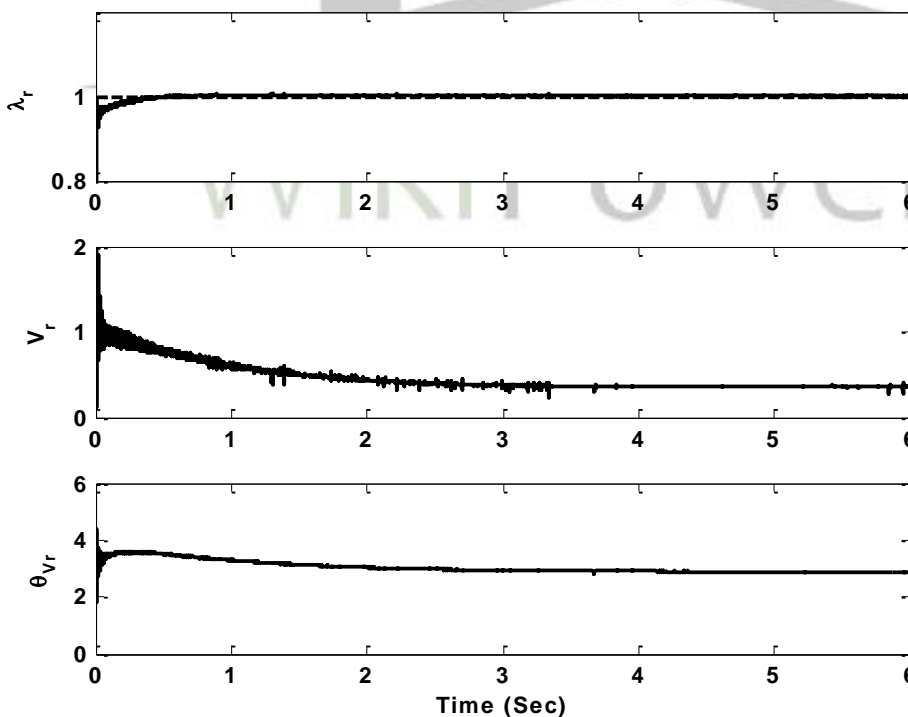
جدول ۳-۳: ضرایب کنترل‌کننده‌ها در حالت راه‌اندازی و عملکرد عادی

کنترل	راه‌اندازی		عملکرد عادی	
	$K_p$	$K_i$	$K_p$	$K_i$
شار	$K_p = 0.5$	$K_i = 2$	$K_p = 0.5$	$K_i = 2$
سرعت	$K_p = 5$	$K_i = 0$	$K_p = 1e3$	$K_i = 0$
گشتاور	$K_p = 1$	$K_i = 10$	$K_p = 1$	$K_i = 10$
زاویه پره‌ها	$K_p = 1$	$K_i = 100$	$K_p = 1$	$K_i = 100$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



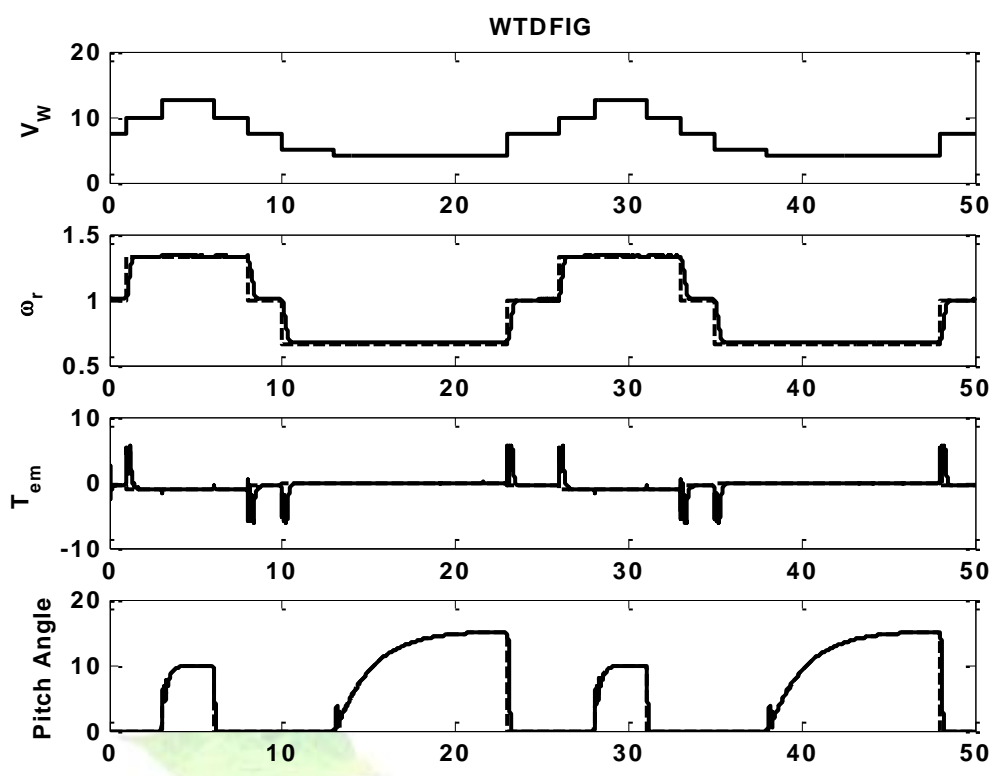
شکل ۵۹-



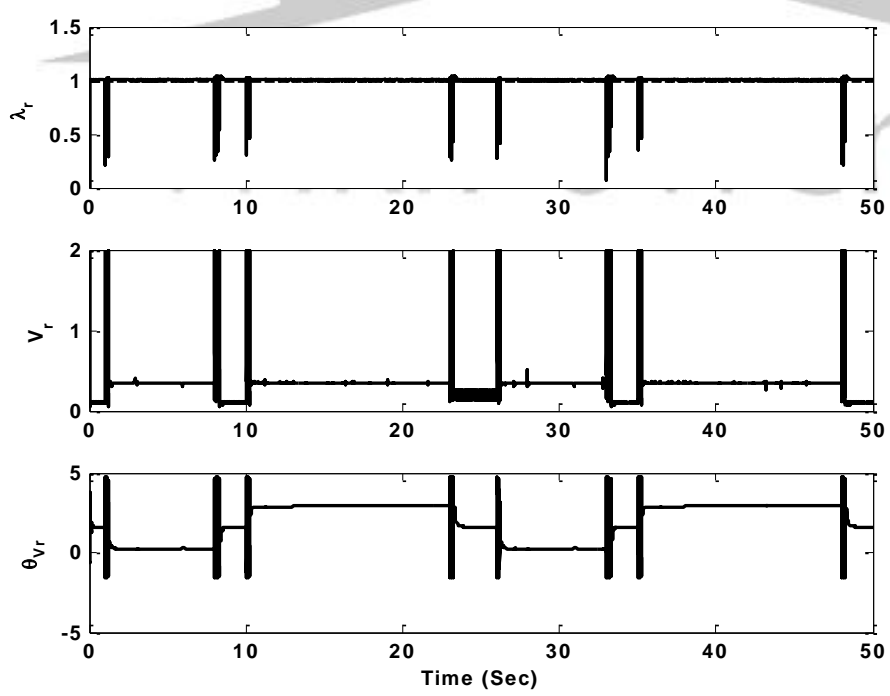
شکل ۶۰-

شکل ۳- ۴: راه اندازی WTDFIG با ضرایب کنترلی راه اندازی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



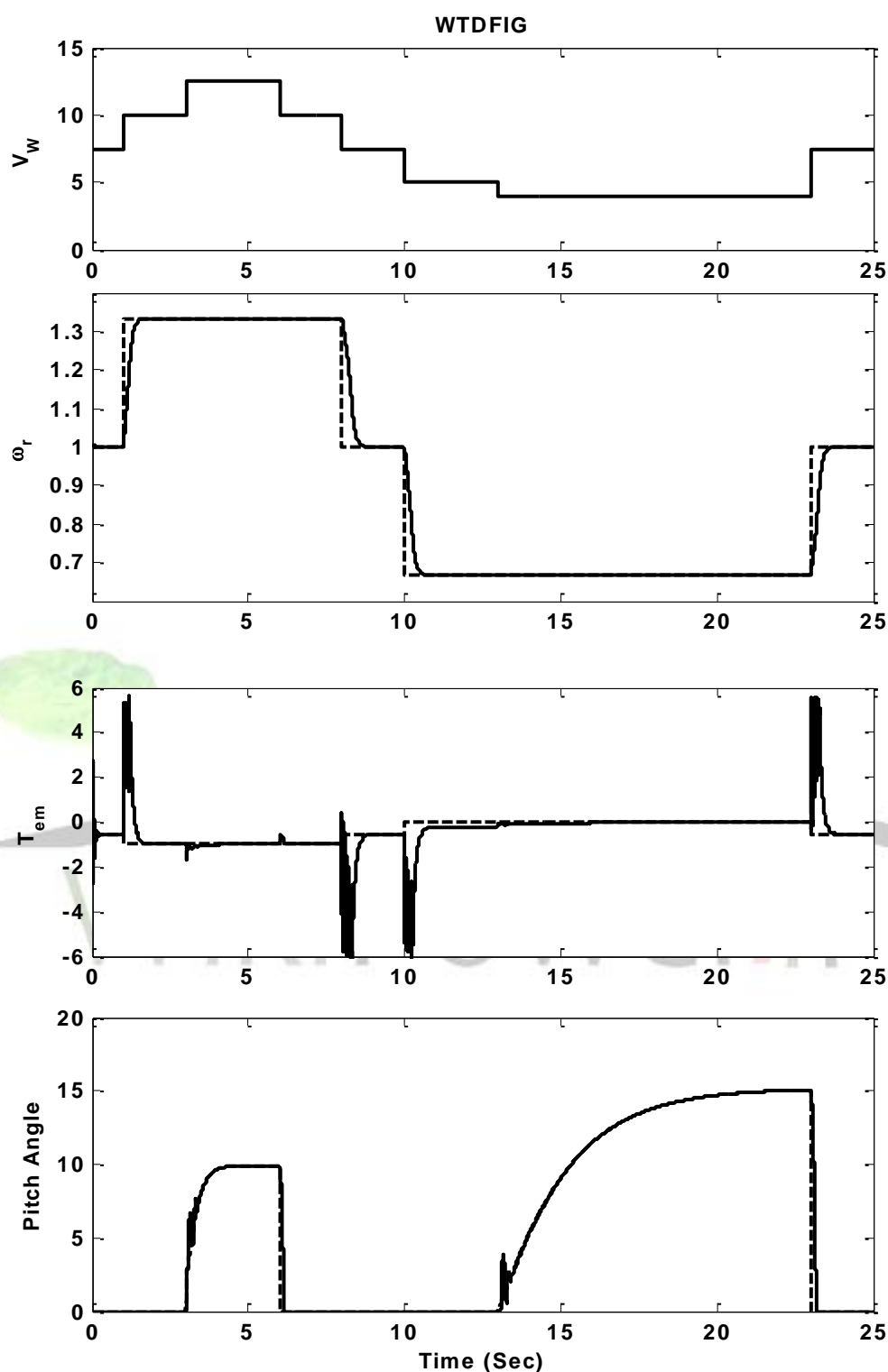
شکل ۶۱-



شکل ۶۲-

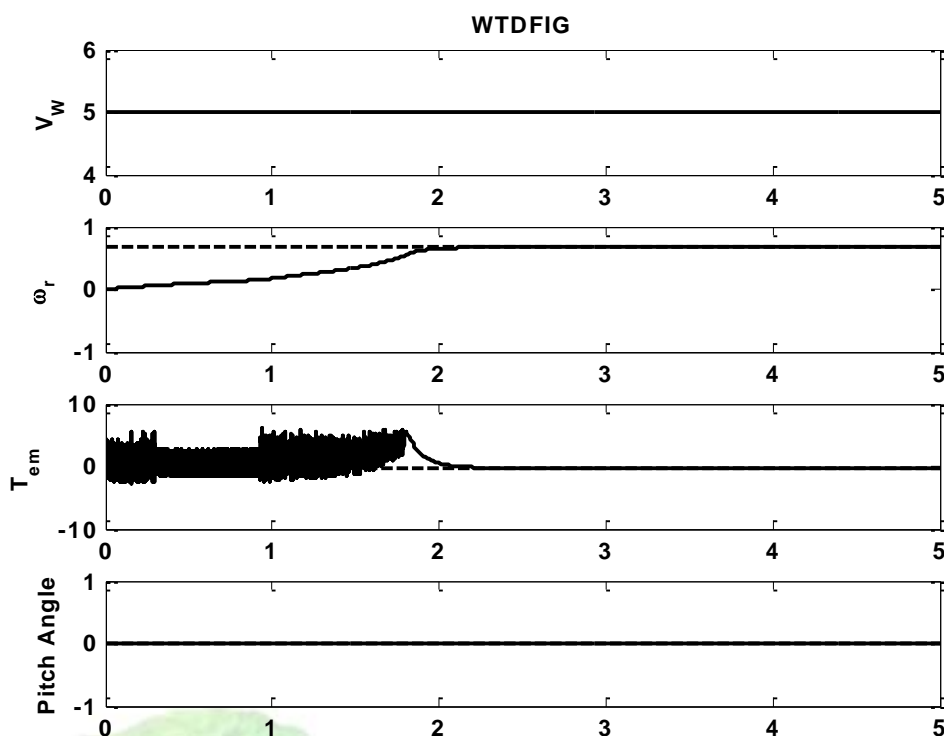
شکل ۳-۵ : عملکرد عادی WTDFIG با ضرایب کنترلی عملکرد عادی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

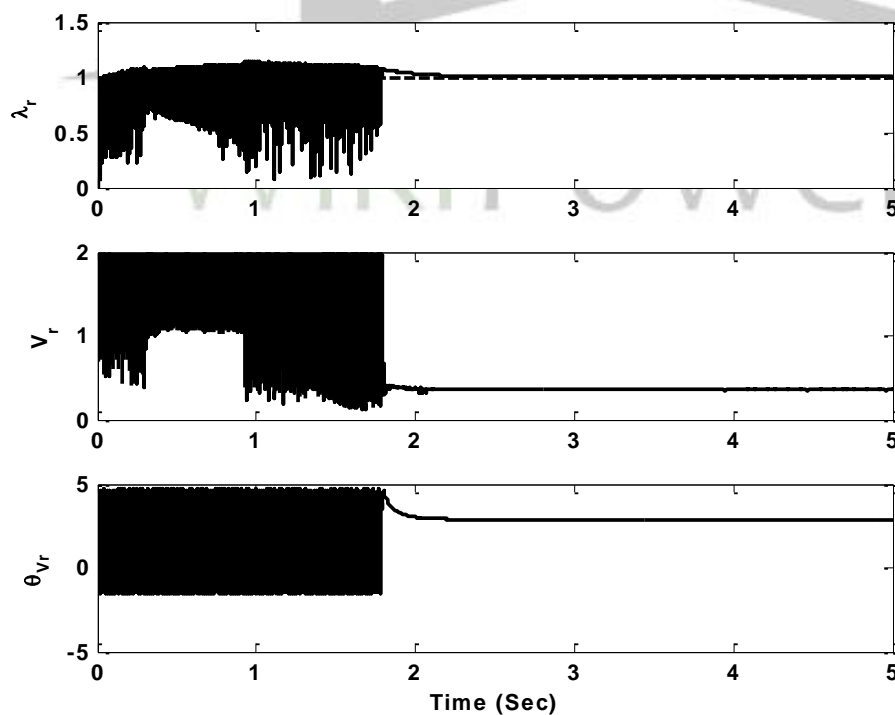


شکل ۳-۶: عملکرد عادی WTDFIG با ضرایب کنترلی عملکرد عادی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۶۳-



شکل ۶۴-

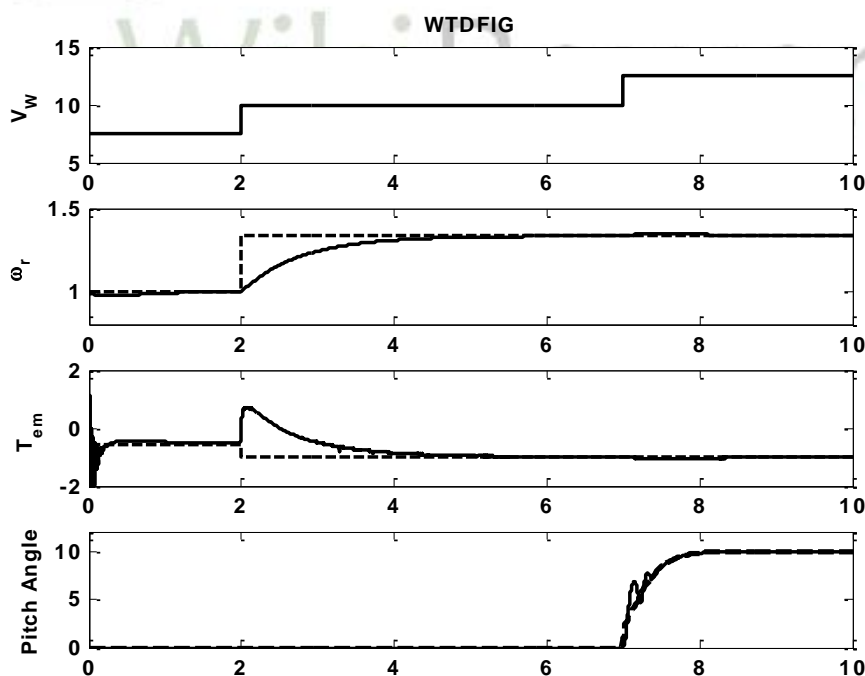
شکل ۳-۷: راه اندازی WTDFIG با ضرایب کنترلی عملکرد دائم



## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

از مقایسه شکل ۳-۴ و شکل ۳-۷ به وضوح دیده می شود که ضرایب کنترلی برای راه اندازی و عملکرد دائم باید متفاوت باشد. در شکل ۳-۷ راه اندازی با ضرایب عملکرد عادی بررسی شد، عکس این کار را نیز می توان انجام داد که در شکل ۳-۸ آمده است. با مقایسه شکل ۳-۸ و شکل ۳-۶ دیده می شود که اگر بخواهیم از ضرایب راه اندازی، برای عملکرد عادی استفاده کنیم پاسخ گشتاور بسیار کند خواهد بود. در شکل ۳-۸ در ثانیه ۲ وقتی سرعت باد از ۷/۵ متر بر ثانیه به ۱۰ تغییر می کند، ۲ ثانیه طول می کشد تا گشتاور و سرعت تطبیق پیدا کنند، در صورتیکه این زمان در شکل ۳-۶ کمتر از ثانیه است.

در شکل ۳-۷ وقتی از ضرایب عملکرد عادی برای راه اندازی استفاده می شود، تغییرات شدیدی روی گشتاور پدید مشاهده می شود. علت آن است که در این حالت فرمان سرعت بزرگی به سیستم داده شده است و ضریب حلقه کنترل سرعت که نیز عددی بزرگ است باعث تغییرات شدید فرمان گشتاور و به تبع آن زاویه ولتاژ تغذیه رتور می شود. به همین علت در حالت راه اندازی، ضریب کنترلی حلقه سرعت باید مقدار کمی داشته باشد. حال اگر مانند شکل ۳-۸ از این ضریب کم برای عملکرد عادی استفاده کنیم به سرعت پاسخ بسیار کند خواهد بود.



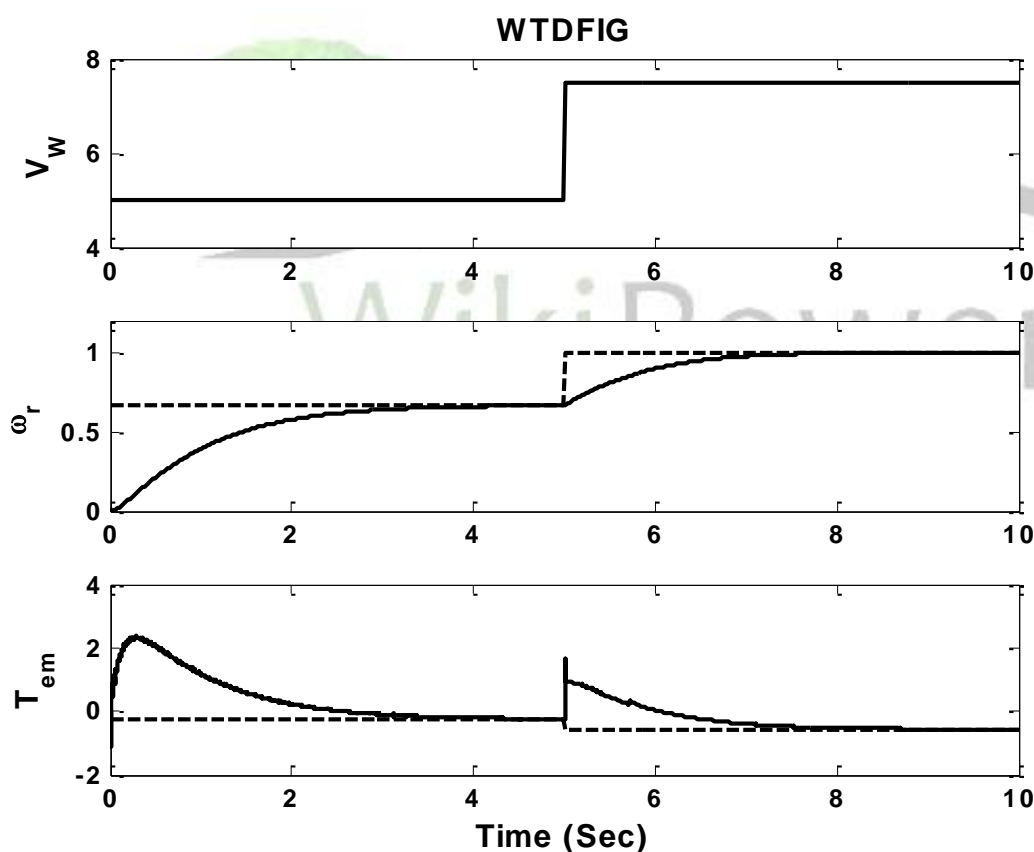
شکل ۶۵-

شکل ۳-۸: عملکرد عادی WTDFIG با ضرایب کنترلی راه اندازی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

## ۱-۱۲ - ۳-۲. نتایج شبیه سازی با کنترل کننده فازی

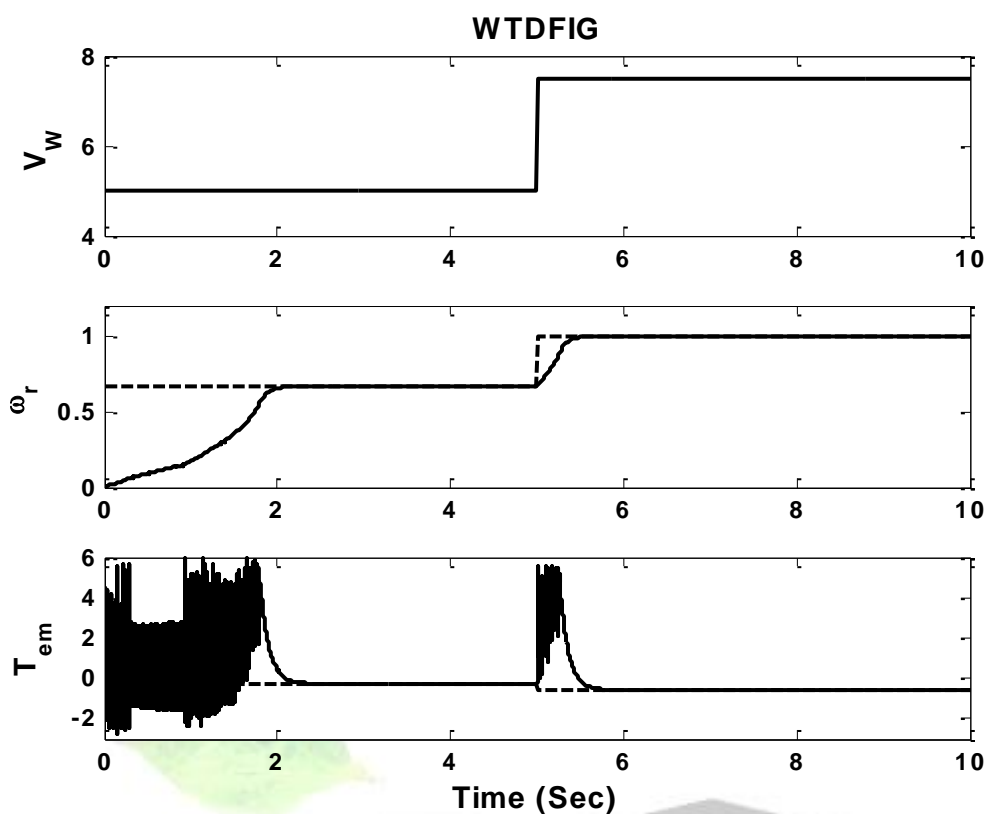
در بخش قبل دیدیم که طراحی کنترل کننده برای حلقه سرعت (ضریب P) به صورت ضریب ثابت نمی تواند پاسخ مطلوبی داشته باشد. این مسأله را در دو شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ به صورت ویژه مورد توجه قرار می دهیم. در این شبیه سازی ها در لحظه صفر فرمان راه اندازی داده می شود و پس از رسیدن به حالت کار دائم، در ثانیه ۵ سرعت باد از ۵ متر بر ثانیه به ۷/۵ متر بر ثانیه افزایش می یابد. شکل ۳-۹ شبیه سازی با ضرایب مطلوب برای عملکرد راه اندازی نرم است و شکل ۳-۱۰ شبیه سازی با ضرایب مطلوب برای پاسخ سریع در عملکردهای عادی. مشاهده می شود که در شکل ۳-۹ پاسخ بسیار کند است. (در حدود ۴ ثانیه) و در شکل ۳-۱۰ نوسانات گشتاور بسیار است. در حالت راه اندازی این نوسانات قابل قبول نیست. (ضرایب کنترل کننده ها مطابق جدول ۳-۳ است).



شکل ۶۶-

شکل ۳-۹: عملکرد WTDFIG با ضرایب کنترلی راه اندازی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۶۷-

شکل ۳-۱۰: عملکرد WTDFIG با ضرایب کنترلی عملکرد دائم

حال برای رفع این مشکل ضریب  $K_P$  در حلقه کنترل سرعت را که در شکل ۳-۲ آمده است به صورت فازی تغییر می دهیم. بدین صورت که ضریب فازی  $K_T$  در ضریبی مانند ۵۰ ضرب می شود و به عنوان  $K_P$  عمل می کند. ضرایب کنترلی این مدل جدید در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴: ضرایب کنترل کننده های مدل فازی

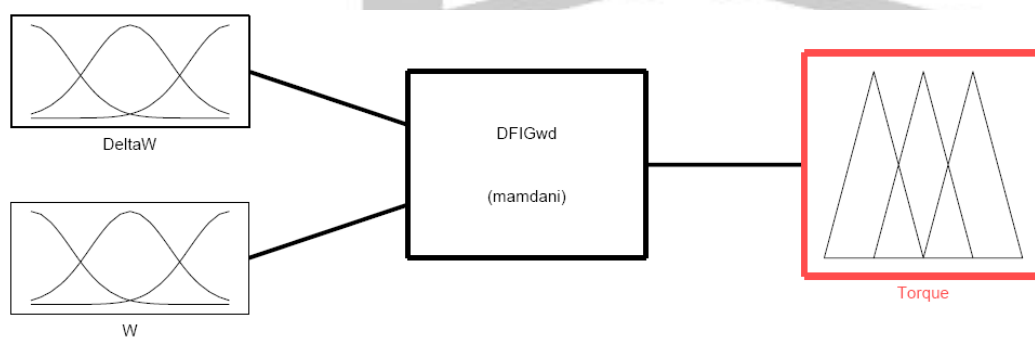
کنترل	ضرایب	
شار	$K_P = 0.5$	$K_I = 2$
سرعت	$K_P = 50K_T$	$K_I = 0$
گشتاور	$K_P = 1$	$K_I = 10$
زاویه پره ها	$K_P = 1$	$K_I = 100$

ضریب  $K_T$  در جدول ۳-۴ به صورت فازی ایجاد می شود. همانطور که در اشکال فوق مشاهده شد، عملکرد ماشین القایی تغذیه دوگانه در سرعت های پایین بسیار کند و غیرخطی است و ضریب کنترلی

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

حلقه سرعت نباید مقدار زیادی داشته باشد. از طرف دیگر در سرعتهای مثلا بالاتر از  $0.4$  سرعت سنکرون، این ضریب باید مقدار حداکثری خود را داشته باشد. اما نکته دیگری نیز باید مورد توجه قرار گیرد و آن اینکه در صورت اعمال تغییر بزرگ (در حد چند دهم پریونیت) در سرعت فرمان، اگر ضریب کنترلی در حداکثر مقدار خود باشد نوسان گشتاور را خواهیم داشت. گرچه این نوسان قابل قبول است اما با تنظیم ضریب حلقه کنترل سرعت، می توان این مشکل را نیز حل کرد.

برای تنظیم مناسب ضریب حلقه سرعت به صورت فازی، ضریب  $K_T$  را متغیر از دو متغیر خطای حلقه سرعت و خود سرعت در نظر گرفته ایم. (شکل ۳-۱۱) اگر سرعت مقدار کمی، در حدود زیر  $0.4$  سرعت سنکرون داشته باشد، ضریب به صورت مشهودی کم خواهد بود. با افزایش سرعت ضریب نیز افزایش می یابد. کنترل دیگری که روی ضریب صورت می گیرد توجه به خطای حلقه سرعت است. برای خطاهای بالا ضریب کوچک است تا از ایجاد نوسانات شدید جلوگیری شود، اما با کاهش خطا، ضریب افزایش می یابد تا سیستم با سرعت بیشتری به حالت دائم برسد. (جدول ۳-۵) نتایج این شبیه سازی در شکل ۳-۳۸ آمده است. شکل ۳-۳۹ نیز تغییرات ضریب  $K_T$  را در طول این شبیه سازی نشان می دهد.



شکل ۳-۶۸

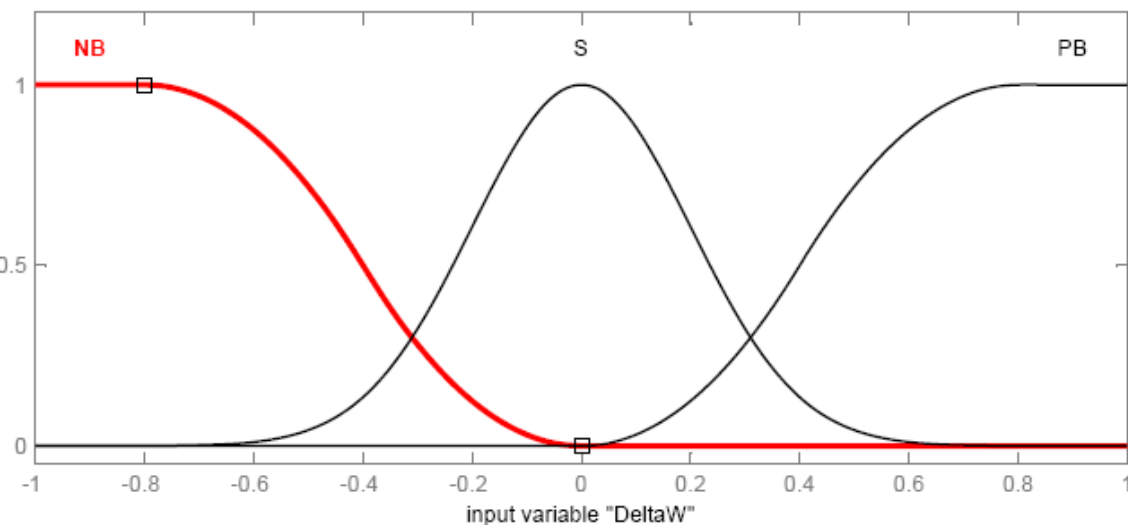
شکل ۳-۱۱: کنترل کننده فازی برای تعیین ضریب حلقه کنترل سرعت

جدول ۳-۵: قوانین به کار رفته در کنترل کننده فازی

$\frac{\Delta\omega}{\omega}$	NB	S	PB
Un5	S	M	S
Up5	M	B	M

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

Membership function plots

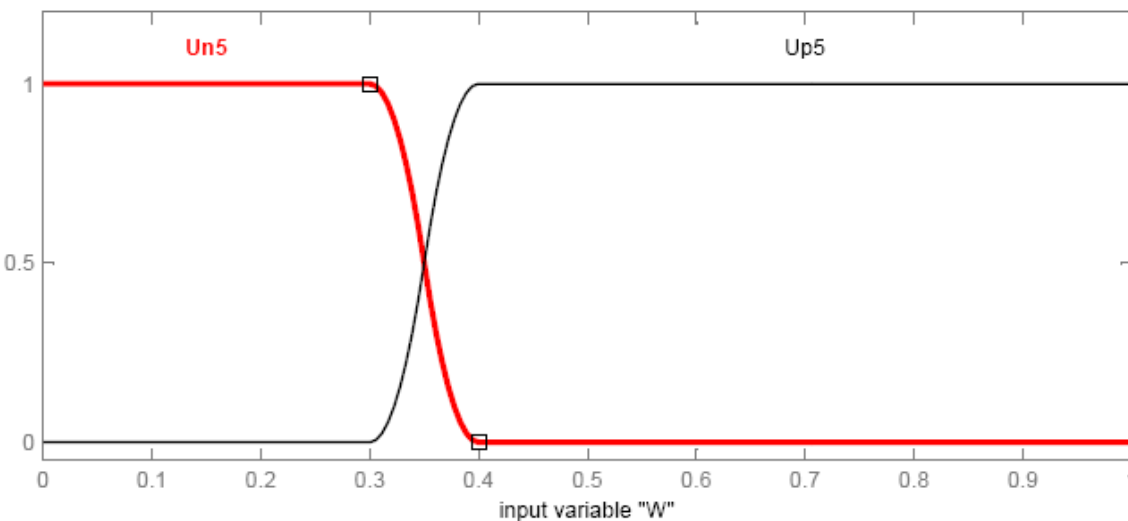


شکل ۶۹-

	$\Delta\omega$
NB	Zmf [-0.8 0]
S	Gaussmf [0.2 0]
PB	Smf [0 0.8]

شکل ۳-۱۲: تابع عضویت ورودی خطای حلقه سرعت به کنترل کننده فازی

Membership function plots

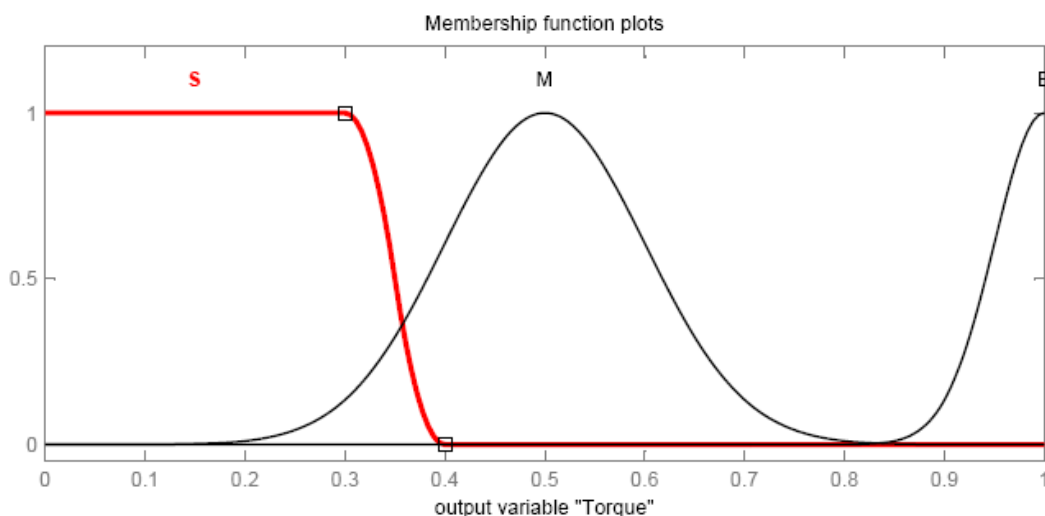


شکل ۷۰-

	$\omega$
Un5	Zmf [0.3 0.4]
Up5	Smf [0.3 0.4]

شکل ۳-۱۳: تابع عضویت ورودی سرعت به کنترل کننده فازی

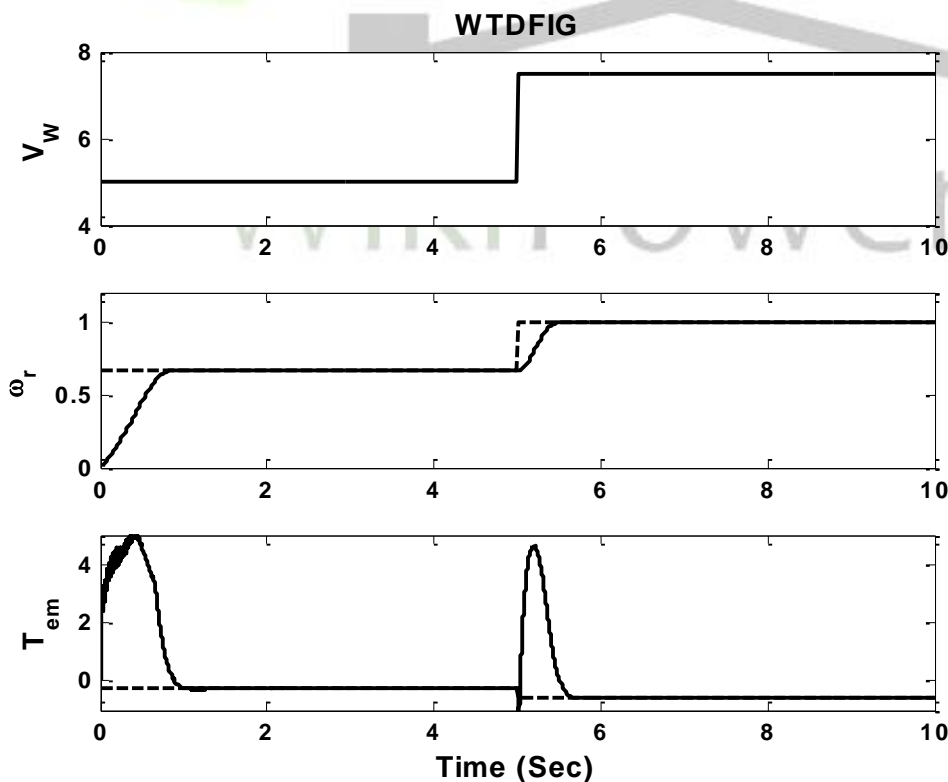
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۷۱-

	$T_K$
NB	Zmf [0.3 0.4]
S	Gaussmf [0.1 0.5]
PB	Gaussmf [0.05 1]

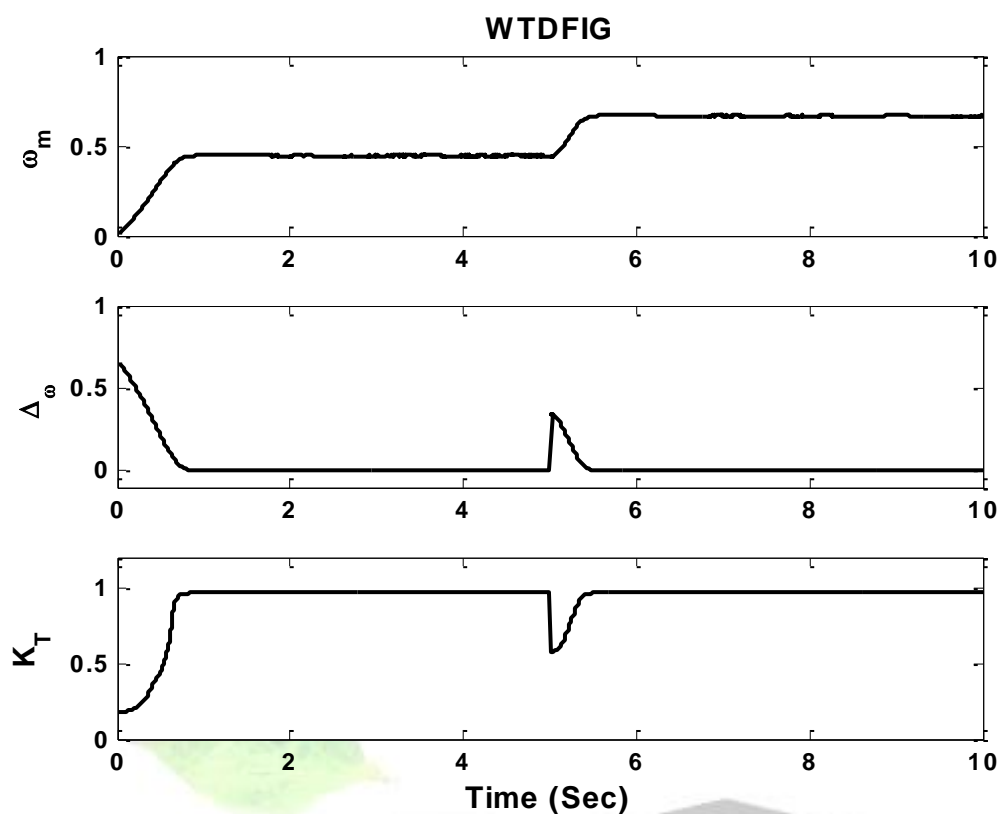
شکل ۳-۱۴: تابع عضویت خروجی کنترل کننده فازی



شکل ۷۲-

شکل ۳-۱۵: عملکرد WTDFIG با ضرایب کنترل کننده فازی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۷۳-

شکل ۳-۱۶: ضریب  $K_T$  در کنترل کننده فازی

مشاهده می شود که علاوه بر نرم بودن راه اندازی و سرعت بسیار خوب آن، سرعت پاسخ عملکرد عادی نیز مناسب است. در تمام حالات نیز تغییرات گشتاور بسیار مطلوب و مقبول است.

۴. نتیجه گیری و پیشنهادها

### ۱-۱۳ - ۴-۱. بحث و نتیجه گیری

با توجه به استفاده روز افزون از انرژی باد برای تولید توان الکتریکی در مزارع بادی و افزایش سطح توان توربین ها و ژنراتورهای بادی، مشخصاً استفاده از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه به عنوان بهترین

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

گزینه مورد توجه بیشتر قرار خواهد گرفت. این بدان علت است که این ماشین خاص منحنی ایده آل و بهینه توربین بادی را می تواند تأمین کند در ضمن می توان از آن برای تنظیم توان راکتیو نیز استفاده کرد. ویژگی دیگر این ماشین نیز هزینه پایین ادوات الکترونیک قدرت به کار رفته در آن است. چراکه تنها ۳۰ درصد توان از این ادوات عبور می کند.

در مدارهای کنترلی متعددی که تا به برای کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته است دو ایراد کلی وجود دارد. اول آنکه کنترل شار مورد توجه قرار نگرفته است و این باعث می شود که از تمام ظرفیت ماشین استفاده نشود و سرعت پاسخ گشتاور لزوماً در بهترین نقطه خود نباشد. ثانیاً مدار عملکردی پره های توربین و محدودیت های آن نیز در شبیه سازی ها لحاظ نشده است.

در این تحقیق علاوه بر رفع دو ایراد فوق، به جای روش کنترل برداری که پیچدگی خاص خود را دارد و نیاز به اندازه گیری کمیت های الکتریکی رتور دارد، از روش کنترل مستقیم گشتاور استفاده شده است. در این روش دیگر نیازی به اندازه گیری کمیت های رتور که فرکانس متغیر و گاه بسیار پایین دارد و تأخیر زیادی را ایجاد می کند جلوگیری شده است. در ضمن این روش کنترلی با ماهیت رفتاری ماشین القایی و تولید گشتاور در این ماشین نیز بسیار نزدیک است.

در این تحلیل از ابتدا قصد ساختن تمام جزئیات ماشین القایی بوده است تا بیشترین شناخت از این ماشین بدست بیاید. به همین خاطر در حین کار متوجه ایراد مدل نرم افزار **MATLAB** در شبیه سازی حالت دینامیکی این ماشین شده و از مدل بدست آمده توسط معادلات ریاضی استفاده شده است که قابلیت های بسیاری را به کاربر برای هرگونه تغییر می دهد. البته صحت عملکرد مدل ریاضی در حالت دائم و دینامیکی ساده با مدل نرم افزار تأیید شده است.

در این طراحی سیستم کنترلی مدل مبدل های الکترونیک قدرت به طور کلی با یک ضریب جایگذاری شده است چراکه که سرعت پاسخ این ادوات در مقابل سرعت پاسخ ادوات مکانیکی بسیار پایین است. (میلی ثانیه در مقابل ثانیه) همین امر به طراح این اجازه را می دهد که تحلیل را با سرعت بیشتر انجام دهد و در ضمن از یک اشتباه و تأخیر غیر واقعی نیز جلوگیری کند. بدین صورت که اگر بخواهیم مدل کامل ادوات الکترونیک قدرت را به کار ببریم، باید خروجی ولتاژ آنها را اندازه گیری کرده به مرجع قابلهای گردان ببریم و سپس به مدل ریاضی اعمال کنیم. این عمل در سمت تغذیه رتور باید انجام شود



## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

که فرکانس پایین و متغیری دارد. در صورتیکه در واقع چنین تأخیر وجود ندارد و ماشین همان تغییرات را بلافاصله دیده و از آن اثر می‌پذیرد. پس اگر ما بخواهیم از مدل واقعی مبدلها در کنار مدل ریاضی استفاده کنیم در اصل تأخیری را وارد محاسبات کرده‌ایم که اصلاً وجود ندارد و به گونه‌ای می‌توان گفت کل تحلیل اشتباه خواهد بود.

در این تحقیق البته بر روی نحوه تولید ولتاژهای مطلوب سیستم کنترل توسط مبدلها بحث کرده، دو روش کلیدزنی **SPWM** و **SVM** را به تفصیل شرح دادیم و نشان دادیم که در عمل در این شبیه‌سازی هر دو روش به توان تولید ولتاژ مورد نظر را دارند. البته سیستم کنترل بر اساس روش کلیدزنی **SPWM** طراحی شده است.

در نهایت مدار کنترلی برای شار، گشتاور، سرعت و زاویه پرها مطابق با سناریوی که در ابتدا مورد بررسی و ساده‌سازی قرار گرفته بود طراحی شد. اما مشاهده شد که به علت رفتار غیرخطی ماشین القایی و توربین باد استفاده از یک ضریب کنترلی ثابت پاسخ مطلوبی نخواهد داشت. به همین دلیل ضریب کنترلی حلقه سرعت به صورت فازی و متناسب با دو متغیر سرعت و خطای حلقه سرعت جایگزین ضریب ثابت شد. شبیه‌سازی نشان داد که کنترل‌کننده فازی توانسته است پاسخ مطلوبی را برای راه-اندازی و عملکرد عادی ارائه کند. البته لازم به ذکر است که کنترل‌کننده‌های فازی بسیاری مورد تحلی قرار گرفت تا این ترکیب پاسخ مطلوب را بدست داد.

### ۱-۱۴ - ۲-۴. پیشنهادها

این موضوع بسیار جدید بوده و جای کار بسیار دارد. به عنوان یک شاخه بسیار فعال بررسی مزارع بادی با این ژنراتورها و سیستم کنترلی می‌تواند مورد تحقیق قرار بگیرد. مورد دیگری به صورت فعال مورد مطالعه قرار می‌گیرد تأثیرات متقابل شبکه و این نوع ژنراتورهای در حالت تک و مزارع بادی روی یکدیگر است. اما مهمتر از تمام اینها ساختن این سیستم توربین - ژنراتور است. در عمل می‌توان این ژنراتور و ژنراتورهای دیگر را به مدل آزمایشگاهی توربین بادی متصل کرد و مدارهای کنترل مختلف را روی آنها اعمال کرد و نتایج را به یکدیگر مقایسه کرد. کلاً علم مهندسی بدون ساختن معنای چندانی ندارد و بدون آن تکمیل نمی‌شود و در اصل می‌توان گفت ارزشی نخواهد داشت. این مسأله البته از ابتدا نیز قابل تأمل است و آن اینکه موضوع از ابتدا باید از روی نیاز تعریف شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۵. مراجع

۱. Edward William Golding, "THE GENERATION OF ELECTRICITY BY WIND

۲. دکتر سید مسعود مقدس تفرشی، "منابع تولید انرژی الکتریکی در قرن بیست و یکم"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۴.

۳. Mukund R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press LLC, 1999  
POWER", E. & F. N. SPON LTD, London, 1976.

۴. Wind Power Plant Behaviors: Analyses of Long-Term Wind Power  
Data, Yih-Huei Wan, NREL.

۵. Modeling Wind Farms for Power System Stability Studies, Yuriy  
Kazachkov.

۶. [Wind](#) Energy Technology, John F. Walker, Wiley 1997.

۷. Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction  
Generator, J.G.Slootweg, H.Polinder, W.L.Kling, 2001.

۸. [Fernando D.Bianchi, "Wind Turbine Control Systems", Springer, 2007.](#)

۹. [Nayeem Rahmat Ullah, "Variable Speed Wind Turbines for Power System  
Stability Enhancement", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION,  
VOL. 22, NO. 1, MARCH 2007.](#)

۱۰. پال. سی. کراوس، تحلیل ماشین های الکتریکی، دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد، نشر دانشگاه  
صنعتی اصفهان.

۱۱. Peter Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford. University Press (UK),  
1998.

۱۲. Prabha Kundure, Power System Stability and Control, McGraw Hill, Inc. 1994.

۱۳. Yazhou Lei, "Modeling of the Wind Turbine with a Doubly Fed Induction Generator for  
Grid Integration Studies", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 21, NO. 1,  
MARCH 2006.

۱۴. Bimal K Bose, "Modern power electronics and AC drives", Prentice Hall, 2002.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱۵. دکتر ابوالفضل واحدی، دکتر سعید افشارنیا، "الکترونیک قدرت و کنترل ماشین های الکتریکی AC"،  
نشر دانشگاه علم و صنعت.

۱۶. دکتر محمد ابراهیمی، "کنترل درایوهای الکتریکی"، نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

۱۷. Bin Wu, "High power converters and ac drives", IEEE Press, 2006.

۱۸. BUJA AND KAZMIERKOWSKI, "DIRECT TORQUE CONTROL OF PWM INVERTER-FED AC MOTORS", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 51, NO. 4, AUGUST 2004.



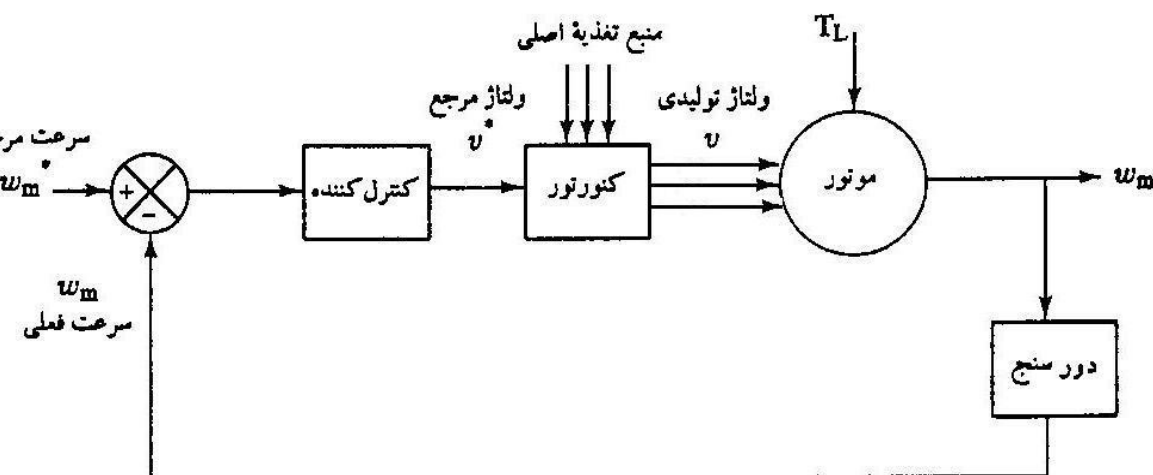
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

پیوست الف. روشهای کنترل اسکالر و برداری

## ۱-۱۵-۱. روشهای کنترل اسکالر (عددی) [۱۵]

به هنگام کنترل کمیتی از یک سیستم مانند سرعت یا گشتاور ماشین الکتریکی لازم است ورودیهای این سیستم تنظیم شود. این تنظیم غالباً به خاطر اینکه سیستم واقعی متفاوت از مدل ریاضی بدست آمده است با محاسبه قابل دستیابی نیست. مثلاً اگر مشخصات مدل ریاضی ماشین القایی را داشته باشیم، منحنی تغییرات بار مکانیکی بر حسب سرعت را نیز داشته باشیم و از ما خواسته شود که ورودی ولتاژ و فرکانس ماشین را معین کنیم به طوریکه در سرعتی خاص با گشتاوری خاص عمل کند؛ شاید به نظر برسد کافی است که از مدل ریاضی کمک گرفته و ورودی را مشخص کنیم ولی در واقع چون مدل ریاضی از بسیاری جهات ساده شده است مقدار محاسبه شده قطعاً خروجی لازم را در واقعیت به ما نخواهد داد. به همین منظور از حلقه‌های پسخور در کنترل استفاده می‌کنند. (شکل ۱)

مقایسه کمیت پسخور شده با مقدار مطلوب آن کمیت وارد یک کنترل کننده می‌شود. خروجی این کنترل کننده میزان ورودی سیستم است. (مثلاً دامنه ولتاژ) کنترل کننده حین ثبت و نگهداری مقدار لازم ورودی، نحوه تعیین آن را نیز کنترل کند. مثلاً اگر ورودی جریان است می‌دانیم که نباید از حدی بیشتر شود یا اینکه کلاً تغییرات بسیار سریع برای برخی کمیتها مطلوب نیست و برای برخی دیگر بلعکس. نحوه تغییر و بدست آمدن مقدار لازم ورودی سیستم برای بدست آوردن کمیت مطلوب را نیز واحد کنترل کننده تعیین می‌کند. به طور کلی می‌توان این قسمت را قسمت سیگنال نامید در مقابل قسمتهای دیگر که قسمت توانی است.



شکل ۷۴-

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم کنترل سرعت [۱۶]

با توجه به ورودی سیستم که مورد کنترل قرار گرفته است، سیستم های کنترل به دو گروه کلی کنترل اسکالر (عددی) و کنترل برداری تقسیم می شوند. در کنترل اسکالر تنها دامنه این کمیت مورد نظر قرار می گیرد ولی در کنترل برداری فاز نسبی این کمیت متناوب نیز نسبت به یک مبنا، کنترل می شود. این موضوع را ابتدای بحث روش های کنترل برداری بیشتر باز خواهیم کرد، اینجا به اصول کلی کنترل ماشین های الکتریکی دوار متناوب و روش های اسکالر کنترل سرعت می پردازیم.

### ۱-۱۵-۱-۱ اصول کلی کنترل ماشین های القایی

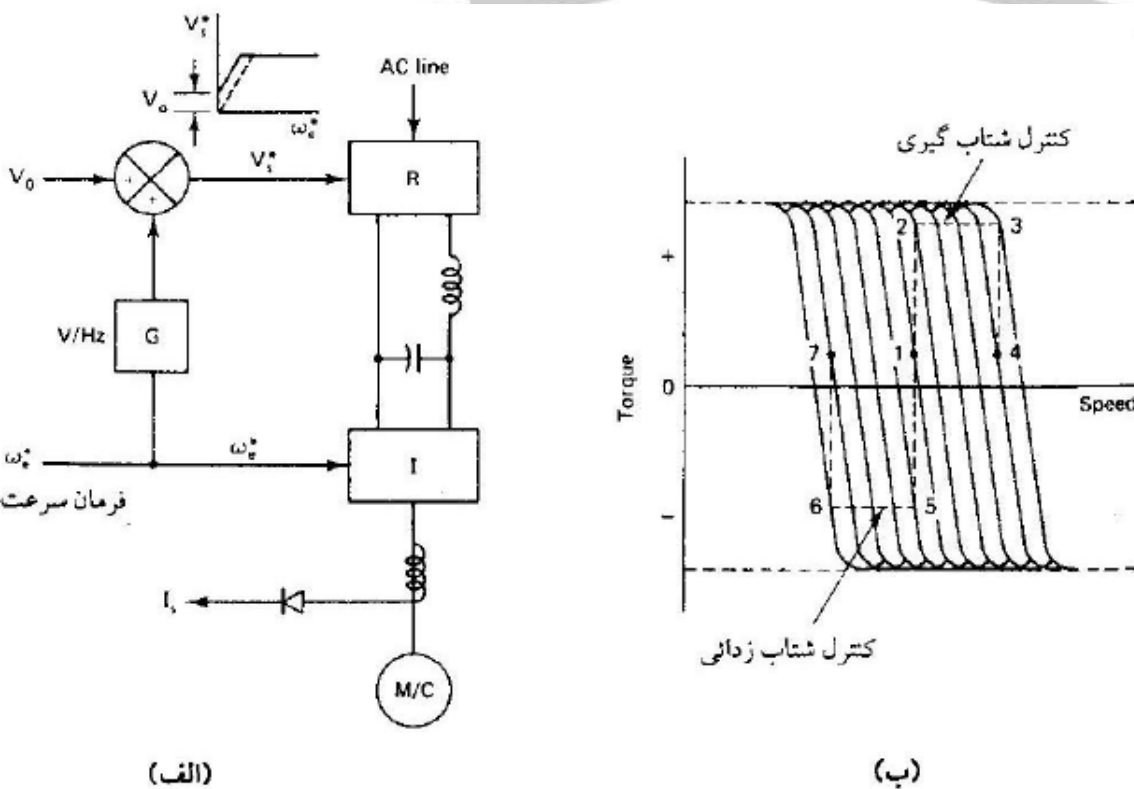
اصولاً کنترل ماشین های القایی به طرز چشم گیری پیچیده تر از کنترل ماشین های dc می باشد و اگر کارایی بالایی از ماشین انتظار رود بر این پیچیدگی افزوده می شود. در حقیقت پیچیدگی بیشتر در اثر رفتار دینامیکی پیچیده ماشین القایی می باشد، اگر فرکانس نیز متغیر باشد این پیچیدگی افزون می گردد. با این حال هر روشی که انتخاب شود باید برخی اصول و محدودیت ها مانند محدوده های حرارتی جریانی و ولتاژی، میزان شار، هارمونیک ها و ... همواره رعایت شود.

در میان اصول کنترلی ماشین القایی موضوع شار از اهمیت ویژه ای برخوردار است چرا که علاوه بر مسائل حدی در عملکرد دینامیکی ماشین نیز مؤثر است. ثابت نگه داشتن شار فاصله هوایی، در بیشترین مقدار مجاز خود، باعث ایجاد بیشترین حساسیت گشتاور نسبت به تغییرات جریان می شود که این امر اثر شدیدی روی رفتار دینامیکی ماشین دارد. اگر شار از این حد کمتر شود دینامیک ضعیف تر شده و اگر بیشتر شود ماشین وارد اشباع شده و رفتار صحیحی دیده نخواهد شد. [۱۵] اگر فرکانس تغذیه ماشین القایی تغییر کند لازم است برای ثابت ماندن شار متناسب با آن ولتاژ تغذیه نیز تغییر کند. بدین ترتیب اگر فرکانس از حد نامی بیشتر شود به علت آنکه امکان افزایش بیشتر ولتاژ وجود ندارد شار تضعیف خواهد شد. اما در ماشین های القایی تغذیه دوگانه به علت ثابت بودن فرکانس تغذیه مشکل وجود ندارد و شار را می توان در تمام محدوده سرعت ثابت نگه داشت و بهترین و سریعترین پاسخ دینامیکی را دریافت کرد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

## ۱-۱۵-۲-۱-۲. کنترل ولت بر هرتز

یک شیوه ساده رایج کنترل حلقه باز از نوع ولت بر هرتز برای موتور القایی در شکل ۲-الف نشان داده شده است. مدار قدرت متشکل از یکسوساز فاز با تغذیه تک فاز یا سه فاز، فیلتر LC و اینورتر شش پالس می باشد. فرکانس  $\omega_e^*$  متغیر فرمان بوده و در صورت صرف نظر نمودن از میزان لغزش کوچک، مقدار آن به سرعت رتور بسیار نزدیک است. این روش کنترل از آن جهت کنترل ولت بر هرتز نامیده شده که ولتاژ یکسوساز ( $V_s^*$ ) مستقیماً توسط سیگنال فرکانسی از طریق بهره ثابت G ساخته می شود. در حالت کار ماندگار، شار فاصله هوایی ماشین ( $\psi_m$ ) ثابت می باشد. ثابت نگه داشتن شار فاصله هوایی باعث ایجاد بیشترین حساسیت گشتاور نسبت به تغییرات جریان می شود که این امر شبیه ماشین های dc است. هنگامیکه فرکانس به صفر نزدیک می شود، ولتاژ استاتور نیز به صفر میل می کند که در این حالت ولتاژ اعمالی فقط برای تأمین افت ولتاژ می باشد. بنابراین، ولتاژ کمکی  $V_0$  بایستی به ماشین اعمال شود تا بر مقاومت اهمی استاتور فائق آید. بدین ترتیب شار فاصله هوایی و گشتاور از مقدار صفر تا مقدار نهایی قابل کنترل می باشد.



شکل ۷۵-۲

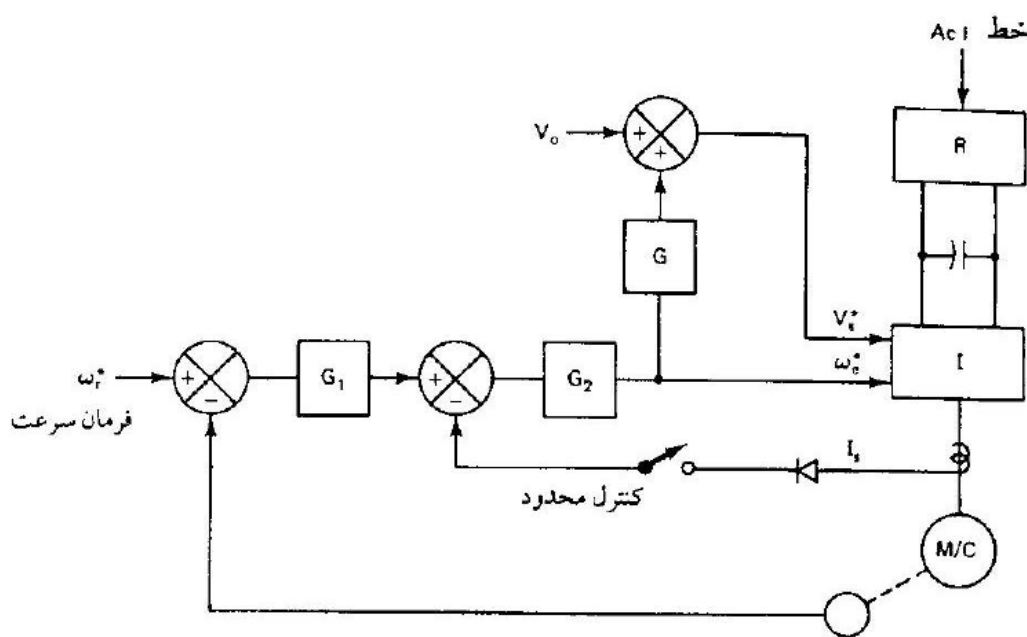
شکل ۲: الف. کنترل حلقه باز ولت بر هرتز، ب. منحنی شتاب گیری و شتاب زدایی

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در شرایط حالت ماندگار، اگر گشتاور بار افزایش یابد، لغزش نیز در منطقه پایدار افزایش می یابد تا اینکه تعادل بین گشتاور بار و گشتاور تولید شده ایجاد گردد. اگر فرکانس کنترل از فرکانس پایه ماشین، بیشتر باشد، ولتاژ یکسوکننده به اشباع رسیده و ماشین از ناحیه گشتاور ثابت وارد منطقه تضعیف میدان می گردد. در این منطقه، شار  $\psi_m$  کمتر و بنابراین گشتاور ایجاد شده برای جریان مشابه کمتر خواهد بود. با کنترل ولتاژ حلقه باز، نوسانات ولتاژ خط و افت امپدانس، سبب نوسانات شار فاصله هوایی می شوند. البته با کنترل حلقه بسته یکسوکننده، می توان از این نوسانات جلوگیری نمود.

مشخصه کارایی شتاب گیری / شتاب زدایی سیستم محرکه در منطقه گشتاور ثابت در شکل ۲-ب نشان داده شده است. در طی عملکرد ماندگار (منطقه ۱) اگر فرکانس فرمان به شکل پله ای افزایش یابد، لغزش گشتاور شکست بیشتر شده و ماشین ناپایدار می شود. به همین ترتیب کاهش پله ای فرکانس نیز باعث ناپایداری می شود. بنابراین لازم است هر دو حالت شتاب گیری و شتاب زدایی، فرکانس تغذیه، سرعت موتور را تعقیب نماید تا لغزش، از لغزش گشتاور شکست بیشتر نشود. کنترل شتاب گیری و شتاب زدایی پیشنهادی در حالت پایدار همان طور که در شکل ۲-ب نشان داده شده، با استفاده از محدودساز جریان ممکن می باشد. با فرمان افزایش پله ای فرکانس، لغزش افزایش یافته و جریان استاتور **Is** تا مقدار حدی، بالا می آید که این مقدار مربوط به گذر از نقطه ۱ به ۲ روط منحنی گشتاور - سرعت می باشد. پس از این، تحت محدوده جریان، روی منحنی گشتاور - سرعت از نقطه ۲ به نقطه ۳ می رود. آنگاه بین نقاط ۳ و ۴، جریان زیر محدوده خویش رفته و نهایتاً نقطه کار ماندگار، نقطه ۴ می شود که فرکانس لغزشی در آن کاهش می یابد. برای فرمان کاهش فرکانس، همانطور که در شکل ۲-ب نشان داده شده، مسیر شتاب زدایی ۷-۶-۵-۱ طی خواهد شد. در مدت شتاب زدایی فرکانس استاتور کمتر از سرعت ماشین می شود و انرژی ماشین به شکل الکتریکی به خط **dc** منتقل می گردد که این امر باعث افزایش ولتاژ می شود. در یکسوکننده های تک قطبی، انرژی ماشین را از طریق مقاومت ترمز دینامیکی با مد برشی جذب نموده و از این طریق ولتاژ را کنترل می کند. در این آرایش با تغییرات گشتاور بار و نوسانات ولتاژ تغذیه، سرعت موتور هم تمایل به تغییر دارد. اگر نوسانات سرعت سیستم حلقه باز جایز نباشد، می توان همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده از یک سیستم حلقه بسته استفاده نمود. همانطور که در شکل نشان داده شده، سیگنال خطای حلقه سرعت، ولتاژ و فرکانس اینورتر **PWM** را توسط کنترل کننده محدودساز جریان کنترل می کنند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



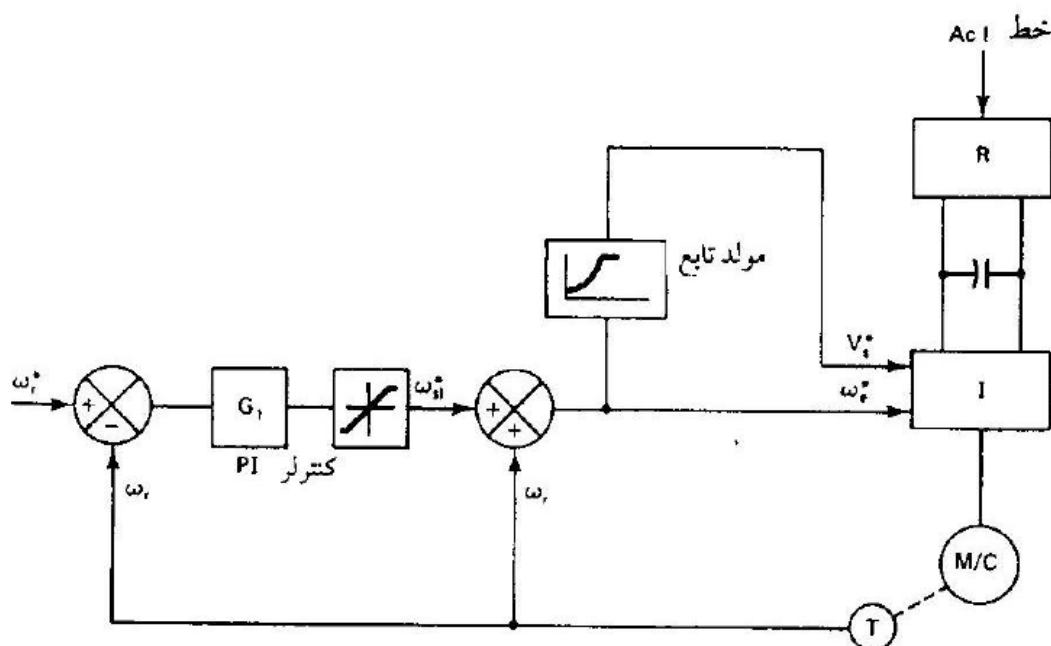
شکل ۷۶-

شکل ۳: کنترل سرعت حلقه بسته از نوع ولت بر هرتز

یک آرایش کنترل ولت بر هرتز، با تنظیم لغزش در شکل ۴ نشان داده شده است. در این نما، حلقه کنترل سرعت فرمان لغزش مورد نظر ( $\omega_{r,i}^*$ ) را از طریق یک کنترل کننده PI و محدودساز، تولید می کند. آنگاه لغزش به سیگنال سرعت اضافه می شود تا فرمان فرکانس تولید شود. همچنین فرمان فرکانس، فرمان ولتاژ را از طریق مولد تابع ولت بر هرتز که جبران افت استاتور در فرکانس پایین را نیز شامل می شود، تولید می کند. از آنجایی که لغزش متناسب با گشتاور تولیدی می باشد، می توان این ترکیب را به عنوان کنترل گشتاوری درون حلقه کنترل سرعت در نظر گرفت. این ترکیب از آن جهت با ترکیب قبلی متفاوت است که در آن کنترل حد گشتاور به طور غیر مستقیم از کنترل حد جریان نشأت می گیرد علاوه بر کنترل گشتاور، مزیت دیگر آن این است که از سنسورهای گران جریانی استفاده نشده و در هر ۲ حلقه یک سیگنال سرعت مورد استفاده قرار گرفته است. با فرمان افزایش سرعت، موتور آزادانه شتاب می گیرد تا به لغزش مربوط به گشتاور ماکزیمم برسد و سپس به مقدار لغزشی که در حالت ماندگار بار تحمیل می کند، کاهش می یابد. اگر فرمان سرعت  $\omega_r$  کاهش یابد، لغزش منفی شده و ماشین به منطقه ترمز دینامیکی یا مولدی وارد می شود. به جای کنترل لغزش می توان مقدار آن را ثابت نگه داشت و در این صورت خطای حلقه سرعت تنها می تواند ولتاژ خروجی اینورتر را کنترل کند.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۷۷-

شکل ۴: کنترل سرعت ولت بر هرتز ثابت با تنظیم لغزش

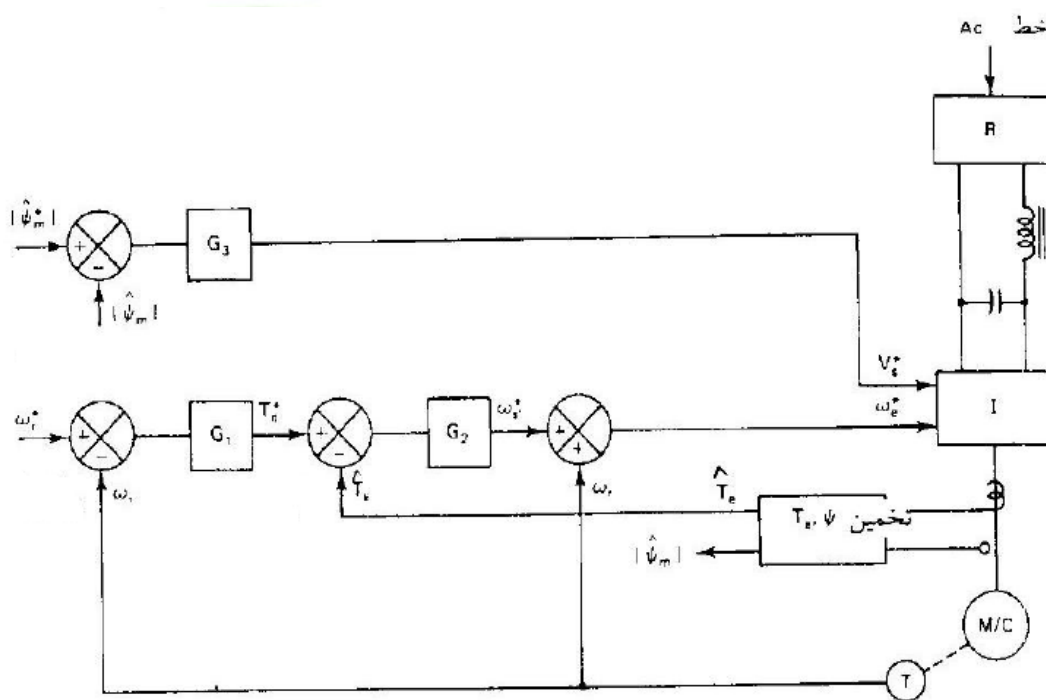
تغییرات در نسبت ولت بر هرتز باعث تغییر شار فاصله هوایی و به همین ترتیب گشتاور تولیدی (  $T_e \propto |\hat{\psi}_m|^2 \omega_{sl}$  ) خواهد شد. کاهش شار فاصله هوایی در بارهای کم به دلیل کاهش تلفات هسته و تلفات مسی، قدری باعث بهبود راندمان می شود. اما عیب آن این است که به دلیل کندی پاسخ شار، ماشین ممکن است در اثر افزایش ناگهانی بار ناپایدار شود.

### ۱۵-۳-۱-۳. کنترل گشتاور و شار

همانطور که اشاره شد، کنترل ولت بر هرتز این مشکل را دارد که ممکن است شار فاصله هوایی ثابت نماند و جابه جا شود و در نتیجه حساسیت گشتاور به لغزش تغییر کند. همچنین اگر نسبت ولتاژ - فرکانس درست انتخاب نشود، می تواند باعث تضعیف شار و یا اشباع آن شود. از سوی دیگر پارامترهای ماشین ممکن است در اثر حرارت و اشباع تغییر کنند که این امر باعث جابه جا شدن مقدار شار فاصله هوایی می گردد. در شکل ۴ اگر شار فاصله هوایی کاهش یابد برای ثابت ماندن گشتاور بایستی لغزش و  $\omega_{sl}$  افزایش پیدا کند. در نتیجه قابلیت گشتاور ماکزیمم ماشین کاهش یافته و پاسخ گذرا نامناسب می شود.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

یک آرایش کنترل سرعت با حلقه‌های کنترلی مستقل برای شار و گشتاور در شکل ۵ ارائه شده است. در این شکل یک حلقه اضافی درون حلقه سرعت تعبیه شده تا پاسخ سرعت سریعتر شده و پایداری نیز بهبود پیدا کند. رگولاتور  $G$  می‌تواند یک جبران‌کننده  $PI$  باشد که در این صورت خطای سرعت حالت ماندگار صفر می‌شود. رگولاتور گشتاور یعنی  $G_2$  می‌تواند بهره تنها یا  $PI$  باشد. اما در هر حال همانطور که در شکل نشان داده شده باید یک محدودکننده داشته باشد. مقدار مرجع شار و مقدار پسخور شار در حلقه کنترل شار با هم مقایسه شده و سیگنال مرجع ولتاژ اینورتر تولید می‌شود. حلقه کنترل مستقیم شار، مسأله جابه‌جایی شار را حل می‌کند، اما باید در نظر داشت که داشتن پسخور صحیح شار کار دشواری است. باید گفت که جریان‌ها و ولتاژهای ترمینال ماشین را می‌توان اندازه‌گیری نمود و مقادیر گشتاور و شار با استفاده از مشاهده‌گر تخمین زده می‌شوند.



شکل ۷۸-

شکل ۵: کنترل سرعت با کنترل مستقل برای شار و گشتاور

به عنوان شیوه‌ای ساده برای اندازه‌گیری شار می‌توان از حسگر اثر هال<sup>۱</sup> در فاصله شکاف هوایی استفاده نمود. البته استفاده از حسگر اثر هال این مشکل را دارد که با تغییر دما، مقدار خروجی حسگر نیز

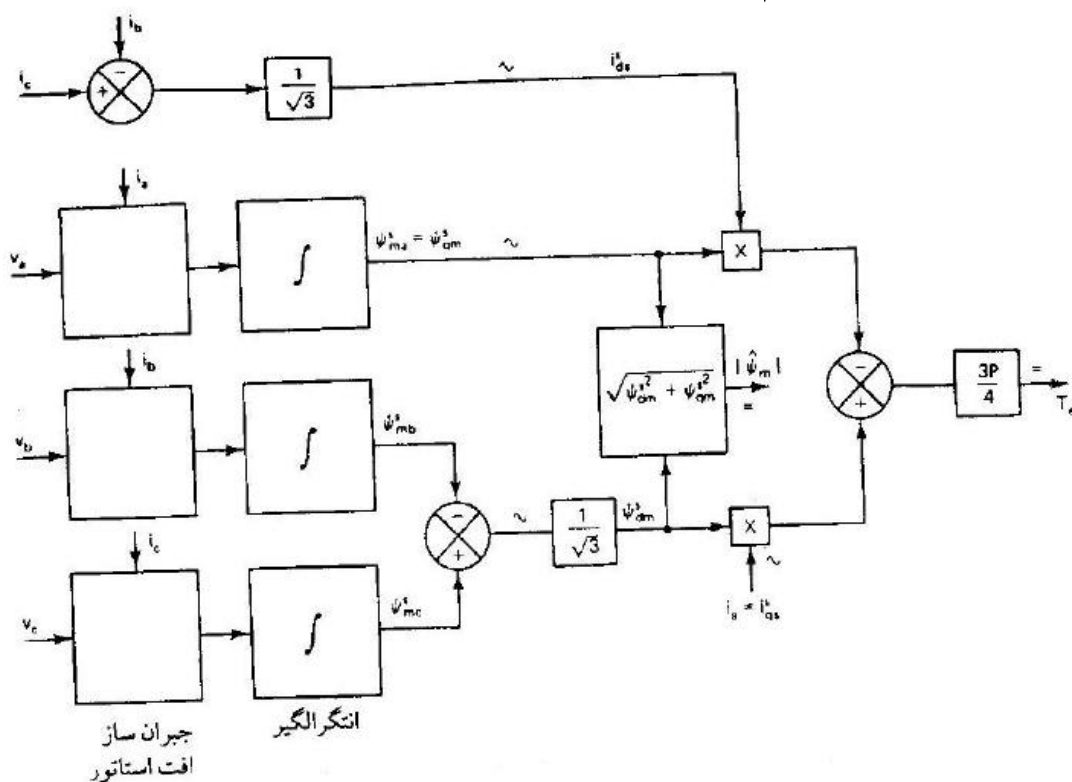
<sup>۱</sup> Hall effect sensor

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تغییر می کند و جبران کردن آن نیز ساده نمی باشد. روش دیگر استفاده از سیم پیچی های شار در فاصله هوایی است که مقدار شار را می توان از روی ولتاژ القایی آنها بدست آورد. در هر حال به کارگیری وسایل خارجی امر مطلوبی از نظر طراحان ماشین ها نمی باشد. می توان همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است سیگنال های شار و گشتاور را از روی مقادیر ولتاژ و جریان فازها از طریق رابطه زیر دست آورد:

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\psi_{dm}^s i_{qs}^s - \psi_{qm}^s i_{ds}^s) \quad ۱$$

$$|\hat{\psi}_m| = \sqrt{(\psi_{dm}^s)^2 + (\psi_{qm}^s)^2}$$



شکل ۷۹-۷

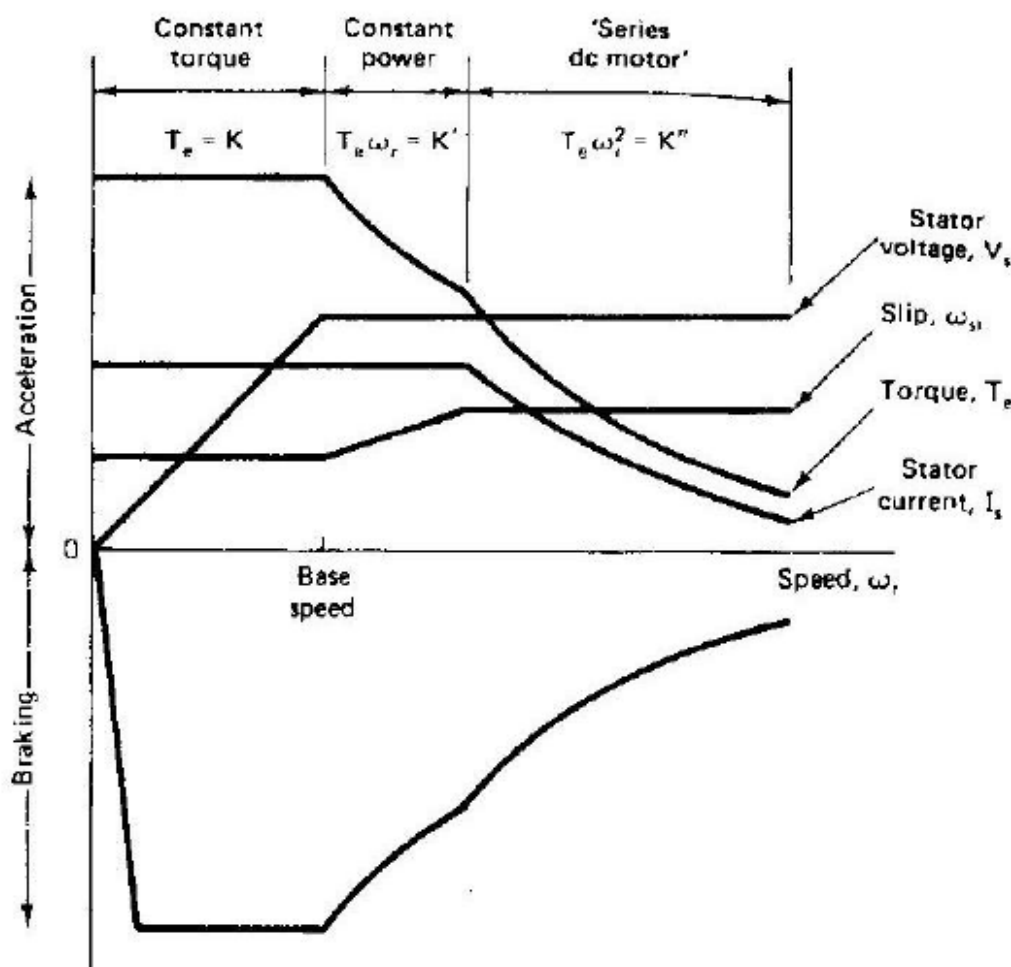
شکل ۶: تخمین سیگنال های گشتاور و شار شکاف هوایی

برای داشتن مقدار ولتاژ شکاف هوایی، ولتاژ خروجی فازها اندازه گیری شده و افت استاتور از آنها کم شده است. این سیگنال ها بعداً ترکیب شده و از آنها انتگرال گیری می شود تا سیگنال مورد نظر به دست آید. عموماً اگر سرعت ماشین کمتر از ۱۰٪ نشود، در آن صورت می توان جبران سازی افت استاتور را نادیده گرفت تا دقت مقادیر محاسبه شده قابل قبول باشد. البته اگر ولتاژ سیم پیچ شار در دسترس می -

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

بود، چنین وضعی بوجود نمی‌آید. روابط اشاره شده در صورتی صحیح هستند که ولتاژها و جریان‌ها متعادل و سینوسی باشند. در عمل فرض سینوسی بودن چندان واقعی نیست.  $|\hat{\psi}_m|$  و  $T_e$  شامل نوسانات هارمونیک می‌باشند و از این رو بایستی از چند فیلتر استفاده شود.

نمای کنترل شکل ۵ در حالت موتوری یا ژنراتوری و نیز در منطقه گشتاور ثابت یا تضعیف میدان به شکل رضایت‌بخش عمل می‌کند. در این حالت ماشین می‌تواند با گشتاور بار کامل راه‌اندازی شود. با شتاب گرفتن ماشین تحت گشتاور ماکزیمم، لغزش  $\omega_{sl}^*$  مقداری مثبت باقی می‌ماند و فرکانس  $\omega_e$  باعث کاهش شار می‌شود، اما حلقه کنترل شار، ولتاژ را نیز افزایش می‌دهد تا شار ثابت بماند. فراتر از فرکانس پایه، اینورتر در حالت موج مربعی کار کرده و شار میدان تضعیف می‌شود و از این رو حلقه شار کنترلش را از دست می‌دهد. برای کار کردن ماشین در منطقه توان ثابت یا تضعیف میدان، محدودیت لغزش را نیز باید در نظر گرفت. عملکرد سیستم محرکه در حالت شتاب‌گیری و ترمز در شکل ۷ تشریح شده است. این شکل مشابه شکل ۴ می‌باشد با این تفاوت که حالت ترمزی نیز به آن اضافه شده است.



شکل ۸۰-

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۷: مشخصات محرکه در حالت شتاب‌گیری و ترمز

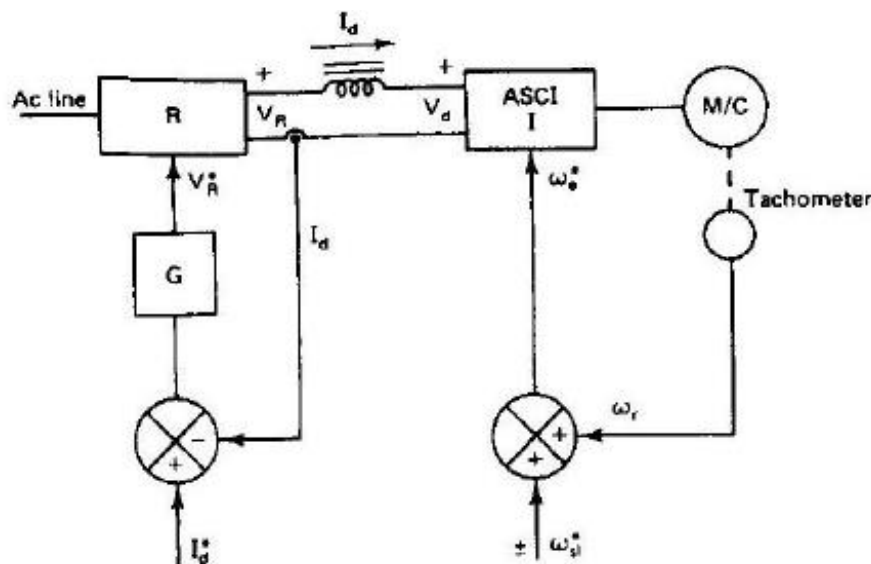
کارایی دو حالت موتوری و ترمزی تا حدودی مشابه هم است لذا فقط در مورد حالت موتوری توضیحاتی می‌دهیم. سیستم محرکه سه منطقه کاری دارد: منطقه گشتاور ثابت، منطقه توان ثابت و منطقه کار معادل موتور **dc** سری که در آن حاصل ضرب گشتاور در مربع سرعت ثابت می‌باشد. در منطقه گشتاور ثابت، اینورتر در حالت کنترل جریان **PWM** کار می‌کند و مشخصات اینورتر با تغذیه جریان را دارد. اما برای سرعت پایه، اینورتر در حالت موج مربعی عمل می‌کند و کنترل جریان **PWM** از دست می‌رود. فرض کنید ماشین از سرعت صفر تحت گشتاور بار کامل با لغزش و جریان محدود شروع به شتاب‌گیری کند. فرض می‌شود که جریان استاتور ماکزیمم، لغزش را زیر مقدار لغزش گشتاور ماکزیمم محدود می‌کند. ولتاژ استاتور متناسب با سرعت افزایش می‌یابد تا اینکه به سرعت مبنا برسد. در منطقه گذر **PWM** زیر سرعت مبنا برش کمتری نزدیک سطح منطقه موج مربعی وجود دارد تا اینکه اینورتر به نرمی به منطقه موج مربعی برود که در اینجا کنترل جریان مستقیم از دست می‌رود. در منطقه توان ثابت، لغزش ثابت می‌ماند اما جریان استاتور همان طور که نشان داده شده کاهش می‌یابد. سیستم محرکه ممکن است تحت گشتاور کاهش یافته در هر سرعتی با استفاده از کاهش لغزش عمل کند. گشتاور ترمز قابل دسترسی با کاهش سرعت، کاهش می‌یابد و در سرعت صفر همان گونه که در شکل نشان داده شده ناپدید می‌شود.

### ۱-۱۰-۴- کنترل لغزش و جریان مستقل

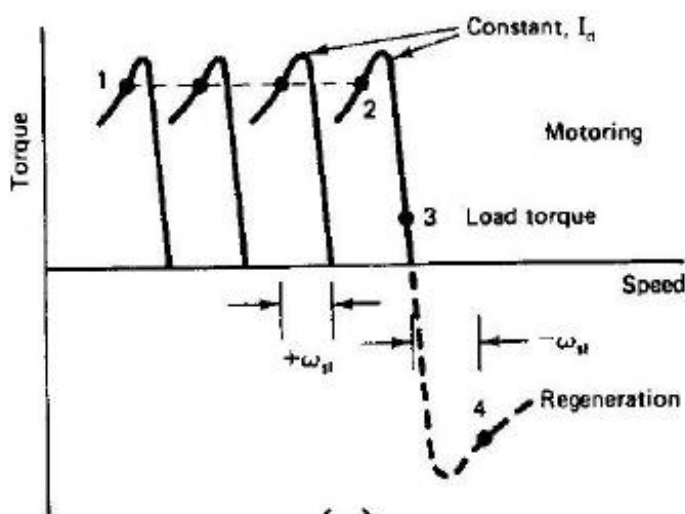
در یک محرکه اینورتر با تغذیه جریان، جریان **dc** و فرکانس اینورتر دو پارامتر کنترل هستند که جریان را می‌توان با تنظیم زاویه آتش یکسوکننده تنظیم نمود. متأسفانه اینورتر با تغذیه جریان مانند اینورتر با تغذیه ولتاژ در حالت حلقه باز نمی‌تواند کنترل شود. حداقل سیستم کنترل حلقه بسته برای اینورتر با تغذیه جریان که در آن جریان و لغزش مستقلاً کنترل می‌شوند در شکل ۸-الف نشان داده شده و در شکل ۸-ب منحنی کارکرد آن به نمایش درآمده است. جریان لینک **dc** توسط یک حلقه پسخور که ولتاژ خروجی یکسوکننده (**VR**) را کنترل می‌کند، کنترل شده و فرمان لغزش هم به سیگنال سرعت اضافه می‌شود تا فرمان فرکانس ساخته شود. ماشین با فرمان لغزش منفی می‌تواند در ناحیه ژنراتوری کار کند که در این حالت پلاریته‌های هر دو ولتاژ **VR** و **Vd** جابه‌جا شده و انرژی به منبع

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

بازگشت داده می شود. بزرگترین عیب این سیستم آن است که روی شار شکاف هوایی ماشین کنترل صورت نمی گیرد. در این سیستم، گشتاور را می توان با کنترل جریان **dc** یا لغزش  $\omega_{sl}$  کنترل نمود.



(الف)



(ب)

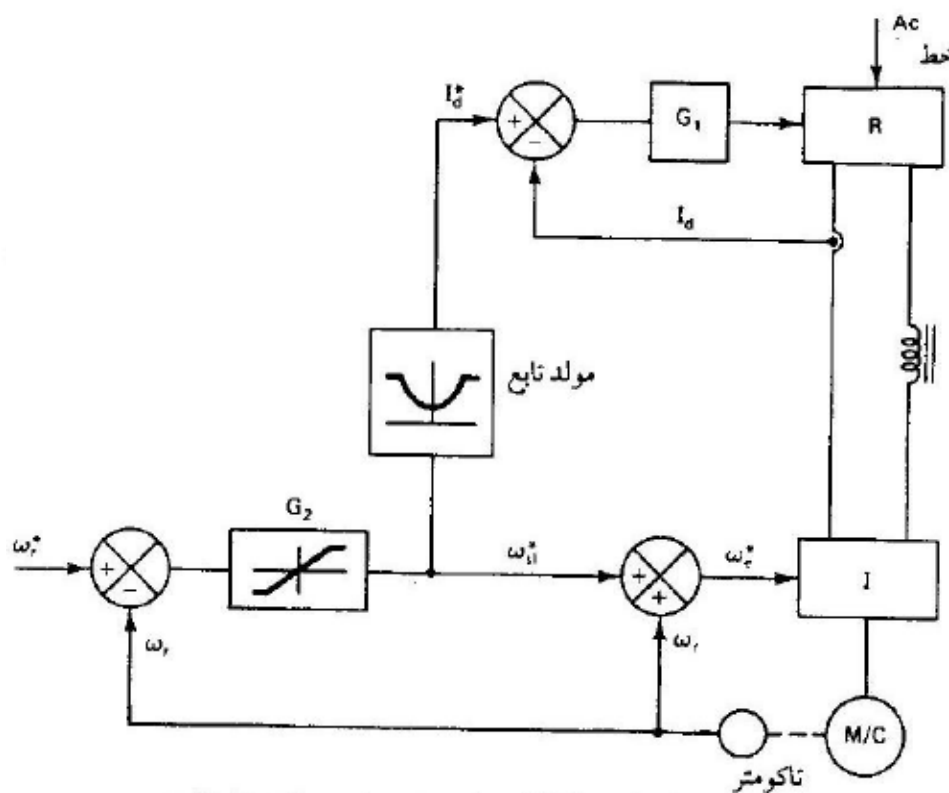
شکل ۸۱-

شکل ۸: الف. کنترل متصل جریان و لغزش، ب. منحنی گشتاور - لغزش در جریان **dc** ثابت

روند شتاب گیری ماشین از نقطه ۱ به نقطه ۲ تحت شرایط جریان ثابت و لغزش ثابت در شکل نشان داده شده است. تعمداً کارکرد ماشین در منطقه ناپایدار منحنی گشتاور - سرعت در نظر گرفته می شود تا شار شکاف فاصله هوایی زیر منطقه اشباع بماند. در شرایط کار ماندگار، اگر لغزش برای متعادل شدن گشتاورهای تولیدی و بار کاهش پیدا کند، نقطه کار ماشین نقطه ۳ خواهد بود که شار ماشین در آن به اشباع می رسد. از طرف دیگر، اگر جریان **I<sub>d</sub>** در لغزش ثابت کاهش یابد تا گشتاور بار متعادل شود،

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ماشین در منطقه تضعیف شار کار می کند. به خاطر مسائل یاد شده، این نوع کنترل به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد. توضیح این مورد کنترلی اهمیت امر توجه به شار و کنترل آن را نشان می دهد. در قسمتی که سیستم پینهادی برای کنترل WTDFIG ارائه شده این مهم مورد توجه ویژه قرار گرفته است. یک نمای کنترل سرعت عملی بهبود یافته با استفاده از اینورتر با تغذیه جریان در شکل ۹ نشان داده شده است که فرمان جریان  $I_d^*$  به عنوان تابعی از لغزش  $\omega_{sl}^*$  ساخته می شود تا شار شکاف هوایی ثابت بماند. ثابت نگه داشتن شار شکاف هوایی باعث بهبود پایداری و سریع شدن پاسخ گذرای سیستم می شود.



شکل ۸۲-

شکل ۹: کنترل جریان قابل برنامه ریزی برای عملکرد شار ثابت

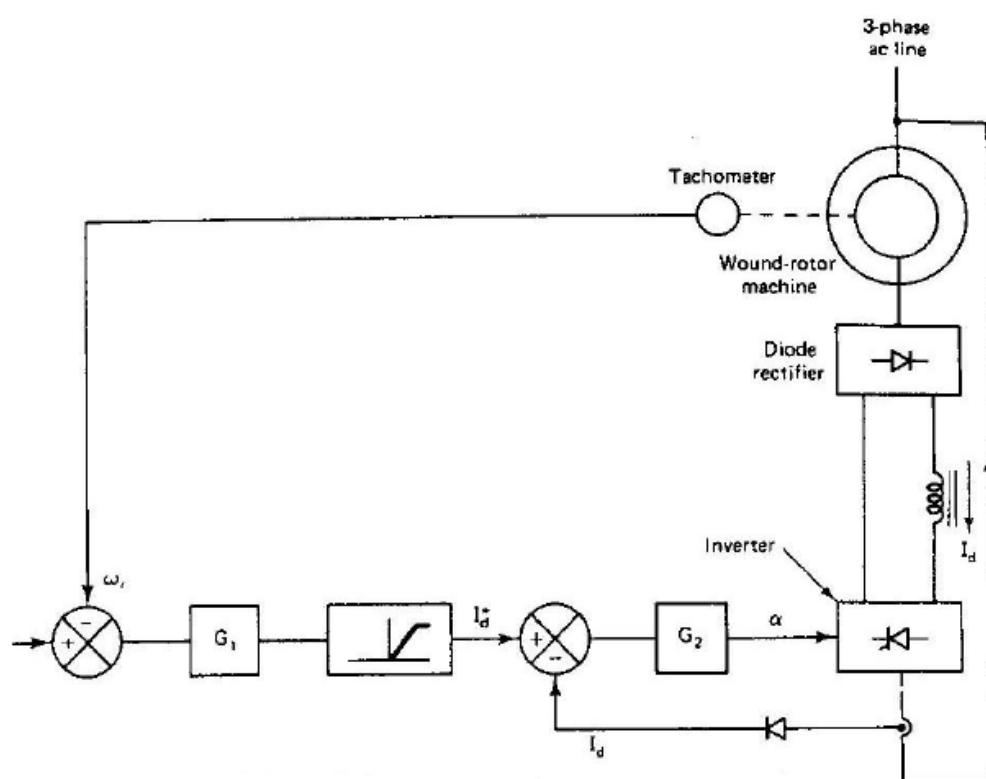
### ۱-۱۵-۵-۱-۵. کنترل بازیافت توان لغزشی

از میان دو شیوه کنترل بازیافت توان لغزشی، روش استاتیک کرامر در اینجا مورد بحث قرار می گیرد. روش دیگر استفاده از روش استاتیک سرببوس است، به علت آنکه روش های کنترل برداری عملاً کاملتر از آن می باشد لازم به بررسی آن نیست.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

یک سیستم با کنترل سرعت با استفاده از روش استاتیک کرامر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این محرکه مشخصه‌ای نظیر مشخصه ماشین **dc** با تحریک مستقل دارد و بنابراین ساختار کنترل، مشابه سیستم محرکه یکسوساز با کنترل فاز می‌باشد. با شار شکاف هوایی ثابت، گشتاور متناسب جریان **dc** می‌باشد که توسط حلقهٔ پسخور کنترل می‌شود. به جای اندازه‌گیری مستقیم **Id**، جریان خط توسط ترانسفورماتور جریان اندازه‌گیری و سپس یکسو می‌شود تا سیگنال **Id** ساخته شود.

این کنترل به شکل قابل ملاحظه‌ای ساده است اما این مشکل را دارد که سیستم محرکه فقط در یک ربع (موتوری زیر سرعت سنکرون) می‌تواند کنترل شود.



شکل ۸۳-

شکل ۱۰: سیستم کنترل سرعت با استفاده از روش استاتیک کرامر

## ۱-۱۶-۲ روش های کنترل برداری [۱۷]

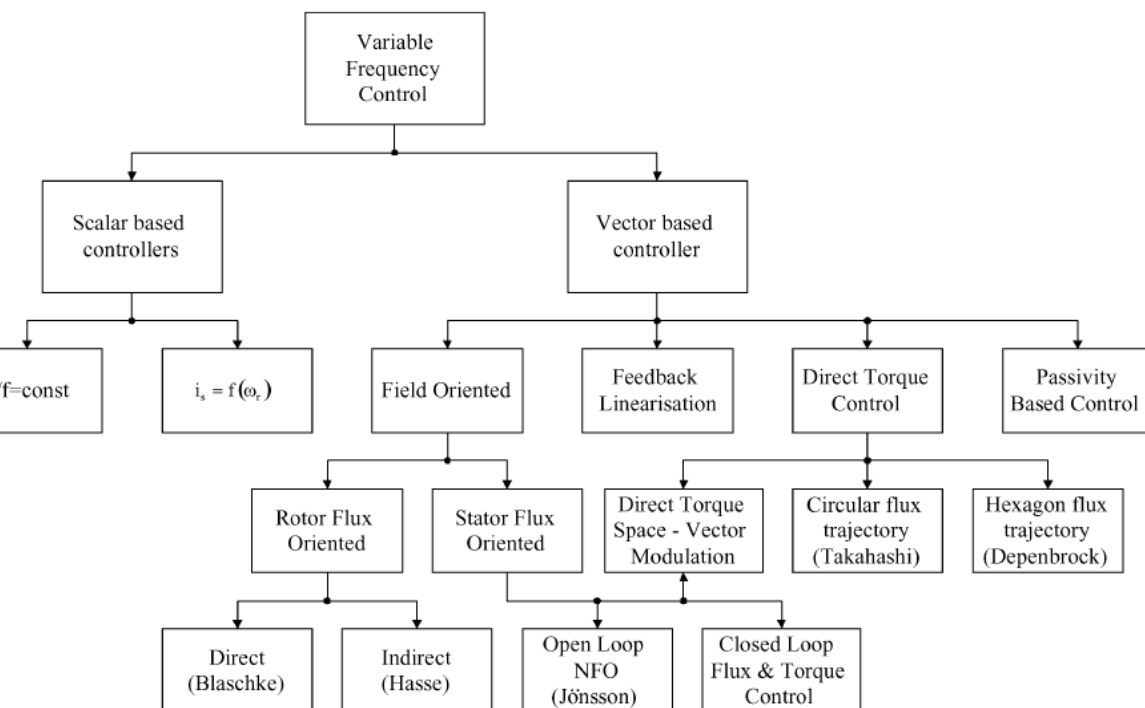
توان و ولتاژ **dc** تنها با مقدار دامنه مشخص می‌شود، در صورتیکه توان و ولتاژ متناوب، علاوه بر دامنه، فرکانس و فاز نسبی نیز دارد. سیستم کنترلی که تنها به دامنه یا فرکانس توجه کند، کنترل اسکالر<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> Scalar Control



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

نامیده می شود و کنترل برداری<sup>۱</sup> سیستمی است که فاز نسبی کمیت های متناوب نیز در آنها مورد توجه قرار می گیرد.



شکل ۸۴-

شکل ۱۱: انواع روش های کنترل اسکالر و برداری [۱۸]

تا به حال دو روش عمده کنترل برداری برای توان های متوسط، متداول شده است: کنترل جهت یابی میدان<sup>۲</sup> و کنترل مستقیم گشتاور<sup>۳</sup>، که به روش های پیشرفته کنترل موتورهای الکتریکی نیز شناخته می شوند.

گاه عنوان کنترل برداری به صورت خاص به کنترل جهت یابی میدان نیز گفته می شود، ولی صحیح آن است که کنترل مستقیم گشتاور نیز می تواند جزء روش های کنترل برداری باشد. مطلب دیگر اینکه اطلاق کنترل مستقیم گشتاور تا حدی در مقابل روش کنترل جهت یابی میدان است که برای کنترل شار و گشتاور (سرعت) از جهت یابی میدان استفاده می کند ولی در روش کنترل مستقیم گشتاور، این کمیت میانه حذف می شود.

<sup>۱</sup> Vector Control

<sup>۲</sup> FOC : Field Oriented Control

<sup>۳</sup> DTC : Direct Torque Control

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

استفاده از روش های کنترل برداری در ماشین های القایی روزبه روز توسعه می یابد چرا که: ۱. این روش های کنترل دینامیک بسیار بالایی دارند، ۲. الگوریتم آنها به سادگی توسط پردازنده های دیجیتال قابل تحقق است، ۳. هزینه پیاده سازی آنها در قبال بهبود عملکردی که نتیجه می دهند بسیار اقتصادی است.

### ۱-۱۶-۱-۲-۱. کنترل برداری جهت یابی میدان

گشتاوری که در ماشین های القایی ایجاد می شود از رابطه ۲ بدست می آید:

$$T_e = \frac{3P}{2} \operatorname{Re}(j\bar{\lambda}_s \bar{i}_s^*) = -\frac{3P}{2} \operatorname{Re}(j\bar{\lambda}_r \bar{i}_r^*) \quad 2$$

و اگر کمیت ها را به مرجع مختصات عمود بر هم  $dq$  ببریم رابطه ۲ به رابطه ۳ تبدیل می شود.

$$T_e = -\frac{3P}{2} (\lambda_{qr} i_{ds} - \lambda_{dr} i_{qs}) \quad 3$$

حال اگر مطابق شکل محور  $d$  را هم جهت با  $\lambda_r$  فرض کنیم؛ خواهیم داشت:

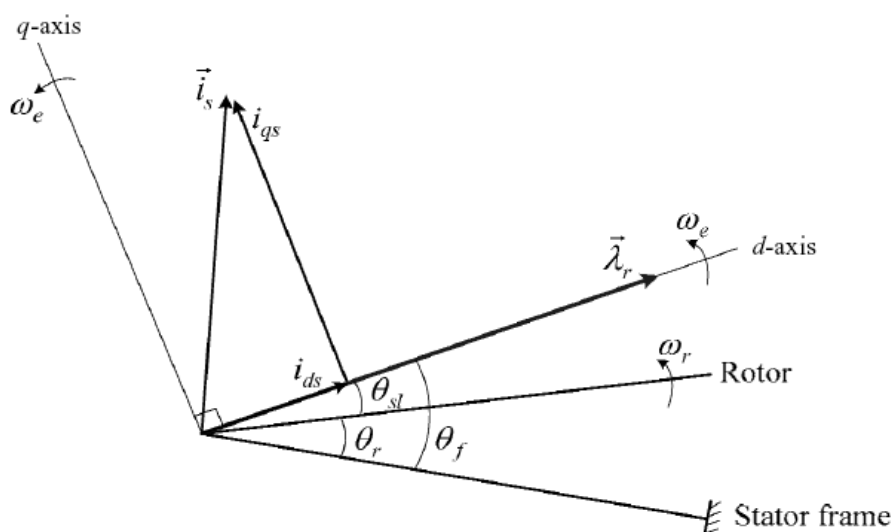
$$\lambda_{dr} = \lambda_r, \quad \lambda_{qr} = 0 \quad 4$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \lambda_{dr} i_{qs} \quad 5$$

رابطه ۵ بسیار شبیه رابطه گشتاور در ماشین های  $dc$  است (رابطه ۶) که در آن گشتاور، حاصل ضرب دو مؤلفه مستقل است؛ یکی شار (میدان تحریک) که ناشی از جریان تحریک ( $i_f$ ) است و دیگری جریان مدار آرمیچر. جدا بودن این دو کمیت این امکان را می دهد که میدان تحریک در بیشترین مقدار خود قرار بگیرد تا رفتار دینامیکی سیستم سریعترین پاسخ را نسبت به تغییرات جریان آرمیچر داشته باشد و از طرف دیگر وارد اشباع نیز نشود.

$$T_e = K_a \lambda_f i_a \quad 6$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

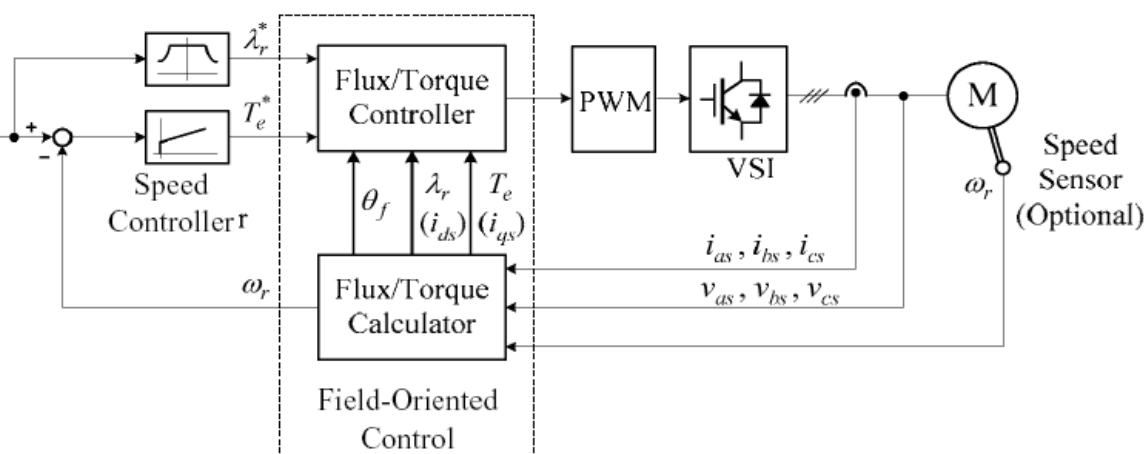


شکل ۸۵-

شکل ۱۲: جهت یابی شار رتور (محور d هم جهت با شار رتور)

این روش کنترل که در آن جهت میدان به عنوان مبنای فاز قرار می گیرد به کنترل جهت یابی میدان

معروف است و گاه بدان کنترل برداری نیز گفته می شود. (شکل ۱۳)



شکل ۸۶-

شکل ۱۳: بلوک دیاگرام کلی کنترل جهت یابی میدان رتور

در این روش به جای جهت میدان و شار رتور می توان جهت میدان استاتور و یا شار فاصله هوایی را

نیز در نظر گرفت. اما معمولترین روش، همین روش جهت یابی میدان رتور است چراکه در ماشین های

القایی اندازه گیری جریان استاتور به مراتب ساده تر از اندازه گیری رتور است که گاه غیر ممکن است. در

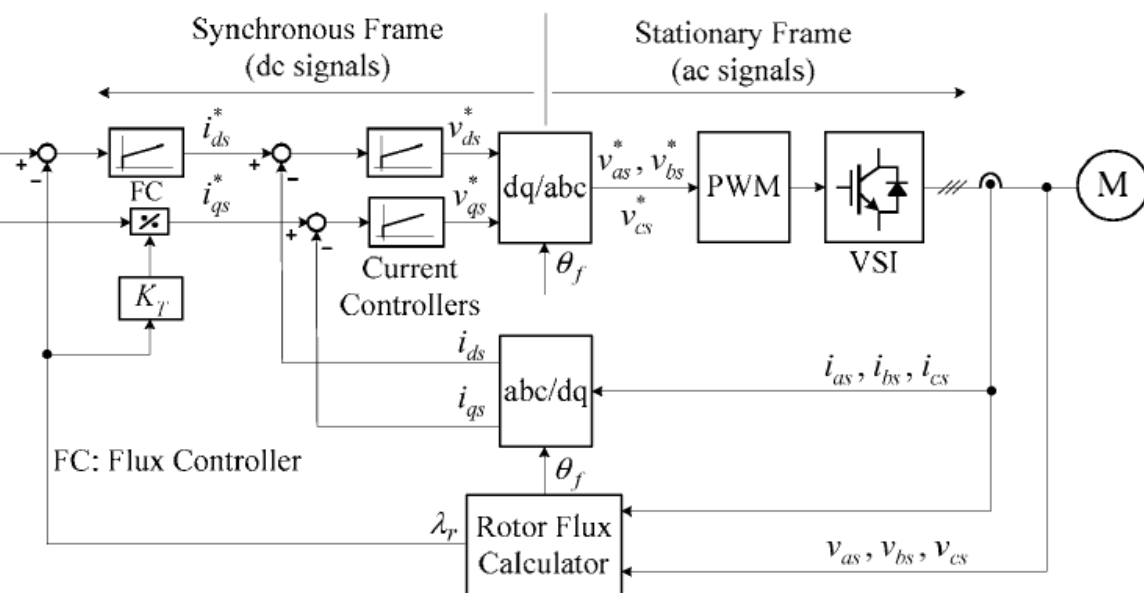
طرف دیگر مسأله اندازه گیری شار موضوع مهمی است که با توجه به آن کنترل جهت یابی میدان به دو

روش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

### ۱-۱-۱۶-۱- کنترل جهت یابی میدان به روش مستقیم

در شکل ۱۴ بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل جهت یابی میدان به روش مستقیم آورده شده است. در این سیستم ۳ حلقه کنترلی وجود دارد؛ حلقه شار رتور، حلقه مؤلفه جریان استاتور در جهت شار رتور و حلقه مؤلفه جریان استاتور در جهت عمود بر شار رتور. برای کنترل شار، شار محاسبه شده (اندازه گیری شده)  $\lambda_r$  با مقدار مرجع  $\lambda_r^*$  مقایسه شده و خطا به یک کنترل کننده داده می شود و کمیت ورودی  $i_{ds}^*$  تنظیم می شود که فرمان حلقه کنترل  $i_{ds}$  است. برای تنظیم جریان  $i_{ds}$  نیز از کنترل کمیت ورودی  $V_{ds}$  استفاده می شود. برای کنترل گشتاور نیز حلقه های کنترلی مشابهی روی  $i_{qs}^*$  و  $V_{qs}$  وجود دارد. نکته لازم به ذکر، نحوه تعیین  $\lambda_r^*$  است که از روی منحنی شار - سرعت تعیین می شود.



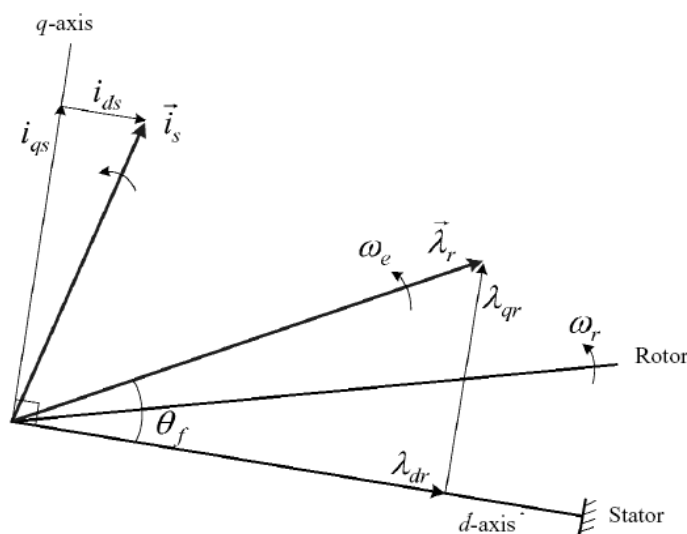
شکل ۸۷-

شکل ۱۴: کنترل جهت یابی میدان رتور به روش مستقیم

برای تولید ولتاژی خاص روی پایانه های استاتور، که در مرجع dq با مبنای شار رتور مورد نیاز است، می توان از اینورتر با روش های کلیدزنی مختلف استفاده کرد که دو نمونه از آن در بخش ۲-۳. روش های کلیدزنی اینورتر) شرح داده شد.

این روش به علت تعیین شار رتور از روی کمیت های الکتریکی استاتور و همچنین داشتن حلقه های کنترل شار و گشتاور کنترل مستقیم نامیده شده است و از مهمترین مسائل آن تعیین همین شار است. برای تعیین این شار از جریان و ولتاژ استاتور استفاده می شود. بردارهای مورد استفاده در این محاسبه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۸۸-

شکل ۱۵: نمودار بردارهای مورد استفاده در محاسبه شار رتور

از روی مدار معادل بدست آمده برای ماشین القایی (شکل ۱۶) داریم:

$$\begin{aligned}\lambda_r &= L_m (i_r + i_s) + L_{lr} i_r \\ &= L_r i_r + L_m i_s\end{aligned}$$

$$\begin{cases} \lambda_s = L_m (i_r + i_s) + L_{ls} i_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \Rightarrow i_r = \frac{\lambda_s - L_s i_s}{L_m} \end{cases} \quad \gamma$$

$$\Rightarrow \lambda_r = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_s - L_s i_s) + L_m i_s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_s - \sigma L_s i_s)$$

که ضریب  $\sigma$  به صورت زیر است:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad \delta$$

از طرف دیگر در مورد رابطه ولتاژ و شار استاتور داریم:

$$V_s = R_s i_s + \lambda_s \quad \Rightarrow \quad \lambda_s = V_s - R_s i_s \quad \epsilon$$

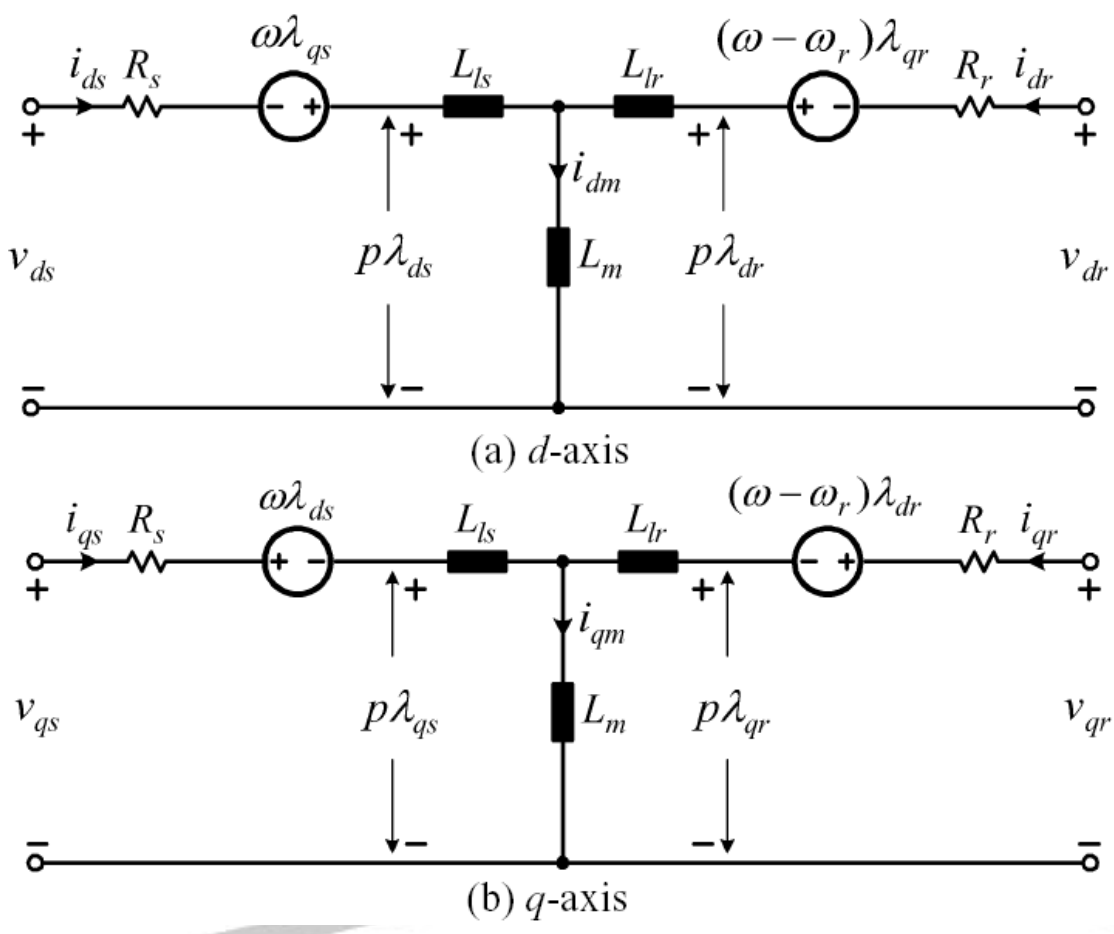
Error! Reference source not found. و Error! Reference source not found. حال اگر روابط

found. را به مرجع **dq** با فاز مبنای ولتاژ استاتور ببریم؛ داریم:

$$\lambda_{dr} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds} - \sigma L_s i_{ds}) \quad , \quad \lambda_{qr} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs} - \sigma L_s i_{qs}) \quad \zeta$$

$$\lambda_{ds} = V_{ds} - R_s i_{ds} \quad , \quad \lambda_{qs} = V_{qs} - R_s i_{qs}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۸۹-

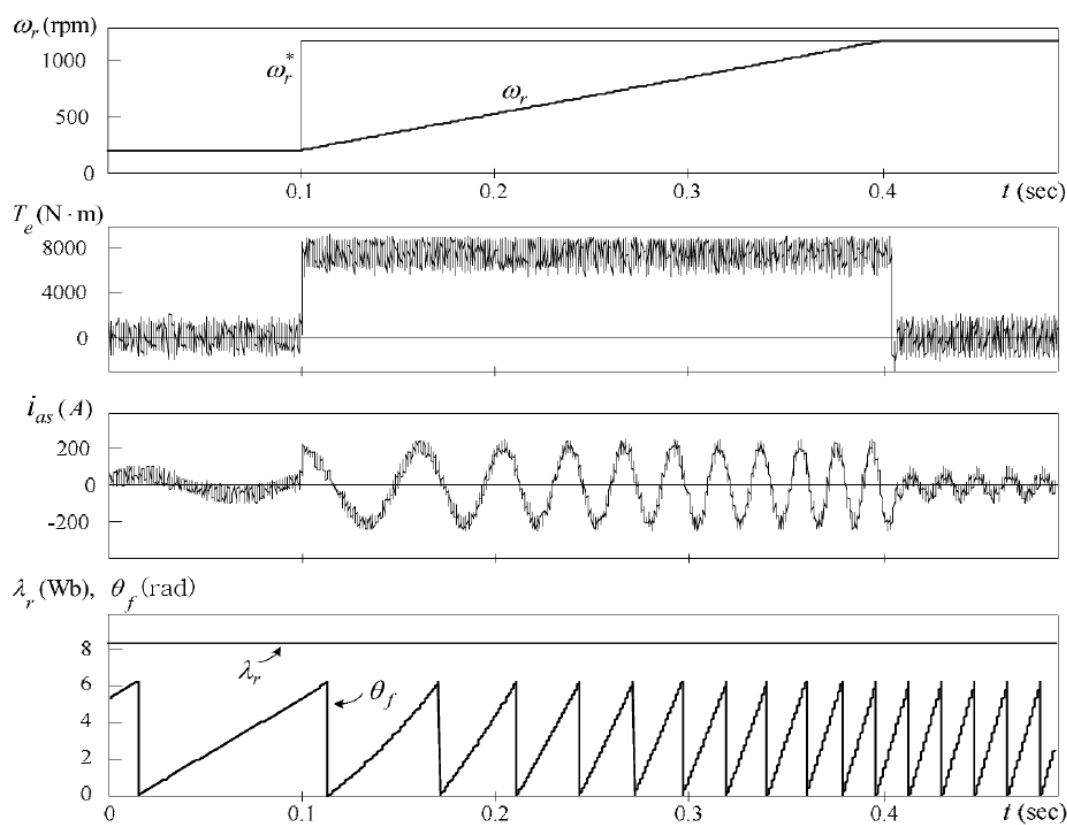
شکل ۱۶: مدل دینامیکی ماشین القایی در محورهای dq  
 با ترکیب روابط فوق، شار رتور به صورت مستقیم مطابق دیاگرام شکل ۱۷ بدست می آید:

شکل ۹۰-

شکل ۱۷: بلوک دیاگرام محاسبه شار رتور

نتایج یک شبیه سازی برای موتوری با مشخصات جدول ۱ در شکل ۱۸ آمده است:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۹۱-

شکل ۱۸: نتایج شبیه سازی ماشین القایی به روش کنترل جهت یابی میدان رتور به روش مستقیم

جدول ۱: مشخصات موتور القایی شبیه سازی شده در شکل ۱۸

Motor Ratings		Motor Parameters	
Rated output power	1250 hp	Stator resistance, $R_s$	0.21 $\Omega$
Rated line-to-line voltage	4160 V	Rotor resistance, $R_r$	0.146 $\Omega$
Rated stator current	150 A	Stator leakage inductance, $L_{ls}$	5.2 mH
Rated speed	1189 rpm	Rotor leakage inductance, $L_{lr}$	5.2 mH
Rated torque	7490 N·m	Magnetizing inductance, $L_m$	155 mH
Rate stator flux linkage	9.0 Wb	Moment of inertia, $J$	22 kg·m <sup>2</sup>
Rated rotor flux linkage	8.35 Wb		

۱-۱۶-۱-۲- کنترل جهت یابی میدان به روش مستقیم

علت اینکه این روش غیرمستقیم نامیده شده به علت آن است که حلقه های کنترل شار و گشتاور حذف شده است و بر خلاف روش مستقیم که شار رتور از روی کمیت های الکتریکی استاتور بدست می آید، در این روش از روی اندازه گیری انتگرالی سرعت (زاویه گردش رتور) بدست می آید:

$$\theta_f = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad 11$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

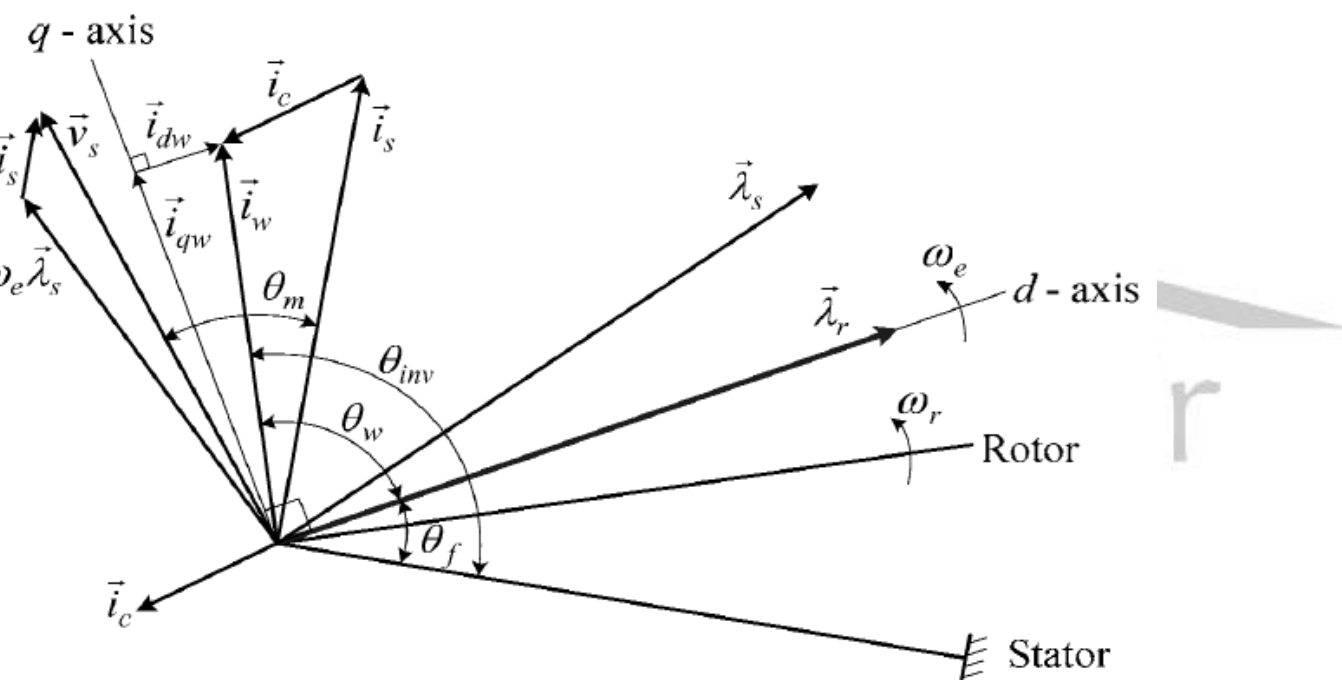
مقدار سرعت لغزش نیز از رابطه ۱۱ بدست می آید البته این رابطه از روی شکل ۱۶ و اتصال کوتاه کردن رتور بدست آمده و برای ماشین القایی تغذیه دوگانه برقرار نیست. کلاً این روش چندان مورد استفاده قرار نمی گیرد چرا که اندازه گیری کمیت مکانیکی زاویه رتور نیز چندان کار ساده ای نیست و بدون خطا نیز نیست. یکی از این موارد خطای زاویه اولیه مکانیکی رتور است که باید تخمین زده شود.

[۱۱]

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\tau_r \lambda_r^*} \dot{i}_{qs}^* \quad , \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad ۱۲$$

روش کنترل جهت یابی میدان را می توان با مبدل های توان جریانی<sup>۱</sup> نیز پیاده سازی کرد. بردارهای

مربوط به این روش در شکل ۱۹ و بلوک دیاگرام سیستم کنترل آن در شکل ۲۰ آمده است.



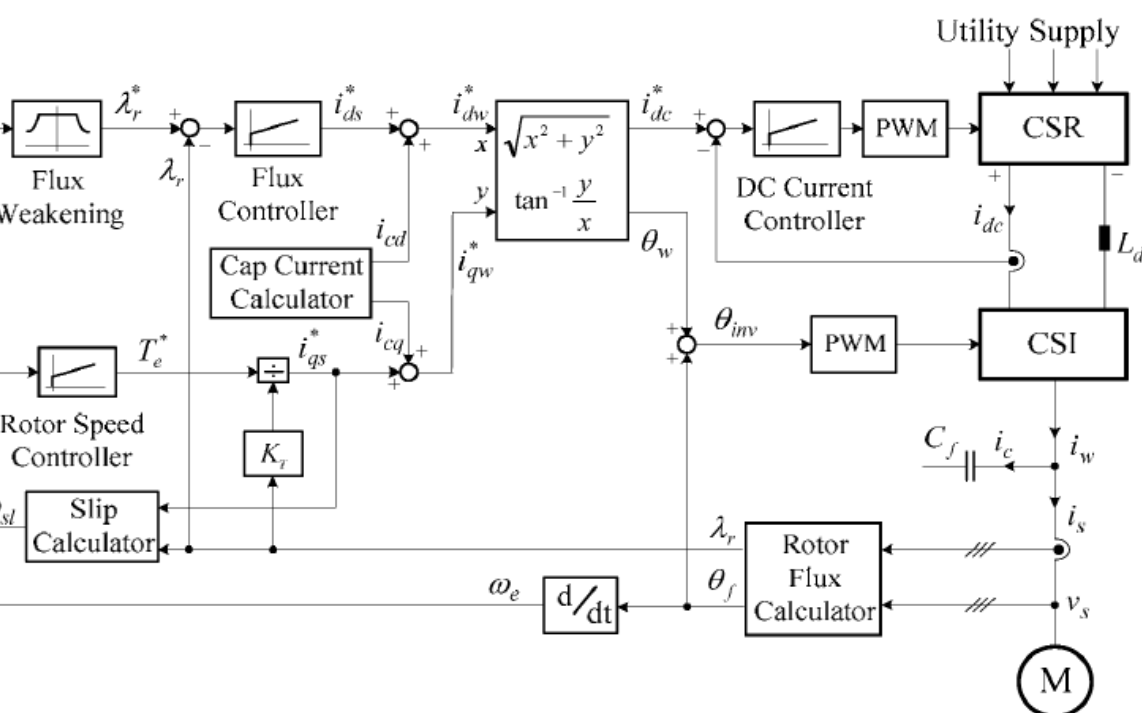
شکل ۹۲-

شکل ۱۹: دیاگرام برداری روش جهت یابی میدان رتور با مبدل جریانی

<sup>۱</sup> CSI : Current Source Inverter



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۹۳-

شکل ۲۰: بلوک دیاگرام سیستم کنترل به روش جهت یابی میدان رتور با مبدل جریانی

## ۱-۱۶-۲-۲-۲. کنترل مستقیم گشتاور

کنترل مستقیم گشتاور، الگوریتم کنترلی ساده تری نسبت به کنترل جهت یابی میدان دارد. پیاده سازی آن نیز راحت تر انجام می شود. همچنین عملکرد آن نسبت به شرایط مختلف پایداری بیشتری دارد. رابطه گشتاور تولیدی در ماشین القایی را می توان به صورت رابطه ۱۳ نیز نشان داد. در این رابطه  $\theta_T$  فاز نسبی شار رتور و شار استاتور است که زاویه گشتاور<sup>۱</sup> نیز نامیده می شود.

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_S L_r} \lambda_S \lambda_r \sin \theta_T \quad 13$$

مطابق رابطه ۱۳ می توان با تغییر زاویه  $\theta_T$  به صورت مستقیم گشتاور را کنترل کرد. در ماشین های القایی معمولی این کمیت توسط تنظیم شار استاتور ( $\lambda_S$ ) کنترل می شود که آن نیز مطابق رابطه ۱۴ توسط تغییر ولتاژ استاتور قابل کنترل است.

$$p \lambda_S = V_S - R_S i_S \quad 14$$

<sup>۱</sup> Torque Angle

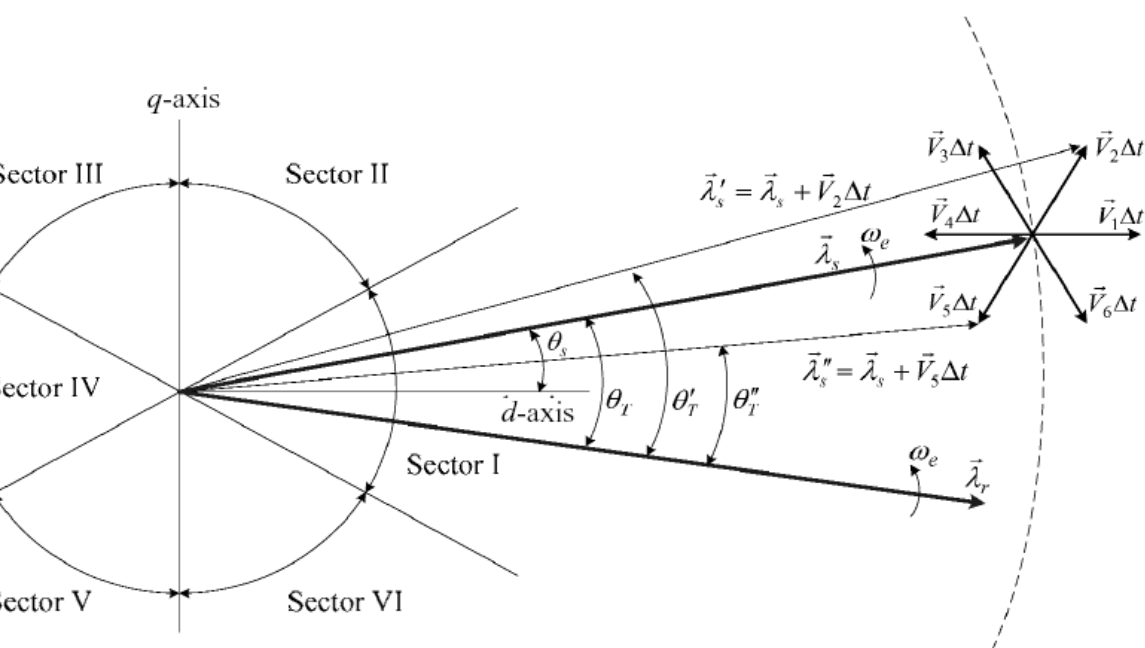
## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با توجه به کوچک بودن  $R_s$ ، تغییر ولتاژ استاتور مستقیماً روی شار اثر می گذارد. این رابطه در شکل ۲۱ در صفحه مختصات نشان داده شده است. در این شکل بردارهای تغییرات ۶ مورد است. این بردارها همان بردارهایی است که در بخش ۲-۳-۲. روش کلیدزنی (SVM) معرفی شده و نحوه عملکرد آنها تشریح شد.

در شکل ۲۱ دیده می شود که با تغییر ولتاژ استاتور، دامنه و فاز شار تغییر می کند. به طور مثال اگر بردار ولتاژ  $V_2$  اعمال شود، دامنه و فاز نسبی شار استاتور افزایش می یابد که باعث افزایش گشتاور نیز می شود. اگر بردار ولتاژ  $V_5$  اعمال شود علاوه بر کاهش دامنه شار استاتور، فاز نسبی  $\theta_f$  نیز کاهش یافته و گشتاور کاهش می یابد. واضح است که در این صفحه مختصات می توان بردارهای ولتاژی را در نظر گرفت که هر تغییری در دامنه و فاز نسبی شار استاتور ایجاد شود اما لازم است بتوان آن را از ترکیب خطی بردارهای ۸ گانه قابل تولید توسط اینورتر ۶ کلیده ساخت. یکی از راهها استفاده از مدولاسیون دو سطحی است که در همان بخش توضیح داده شد.

نکته ای که قابل تذکر و توجه است، تأثیر بسیار اندک تغییرات شار رتور به ازاء تغییر ولتاژ و شار استاتور است، چراکه ثابت زمانی رتور بسیار زیاد است. البته باید توجه داشت در مورد ماشین های القایی تغذیه دوگانه این توضیحات کاملاً معکوس می شود. بدین صورت که به جای شار استاتور، شار رتور توسط تغییر ولتاژ تغذیه رتور کنترل می شود و مقدار شار استاتور در مقابل تغییرات شار رتور ثابت می ماند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

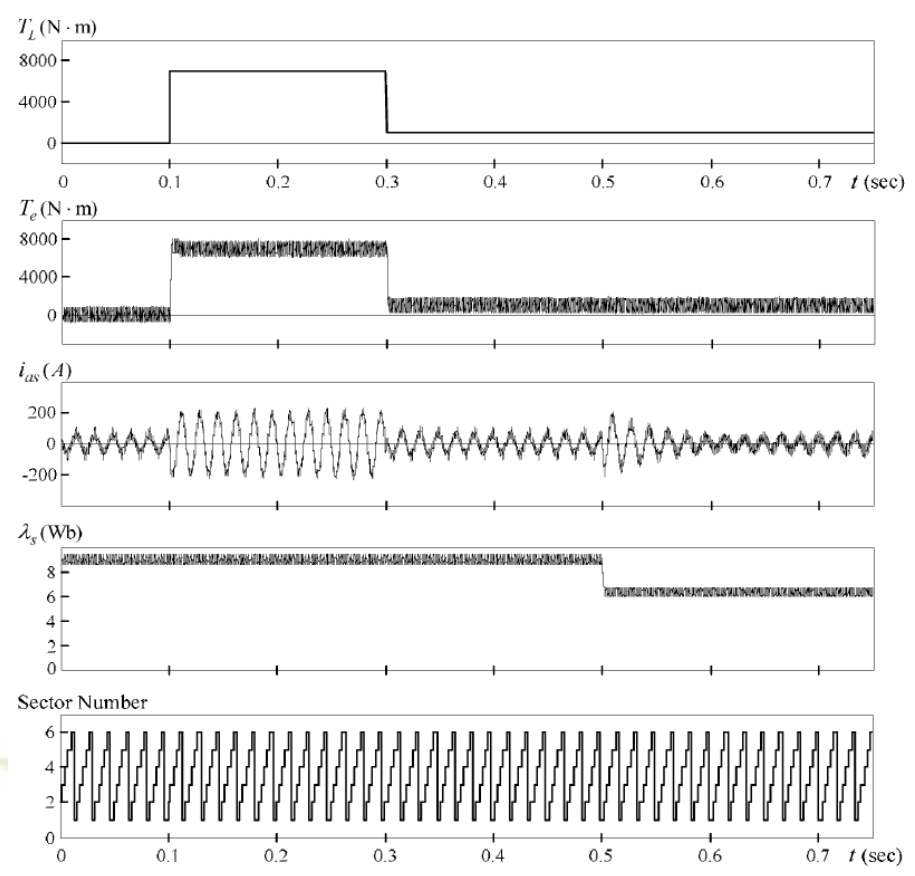


شکل ۹۴-

شکل ۲۱: اصول کنترل مستقیم گشتاور

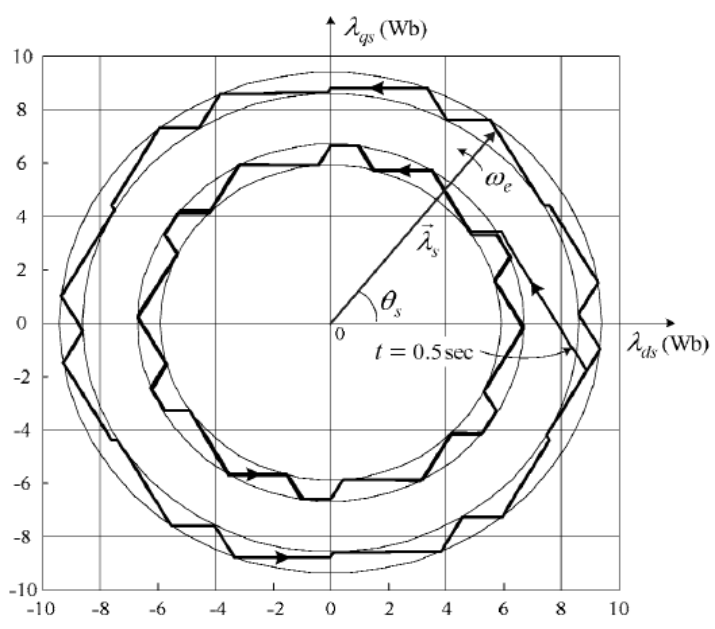
نتایج شبیه‌سازی موتور که در جدول ۱ معرفی شده است با کنترل مستقیم گشتاور در شکل ۲۲ و شکل ۲۳ آمده است. در این تحلیل شار نامی استاتور مقدار **۹ Wb**، سرعت نامی **۱۱۸۹ rpm** و گشتاور نامی **۷۴۹۰ N.m** است. در این شبیه‌سازی ابتدا موتور در سرعت نامی و بدون بار در حال گردش بوده است که بار نامی در زمان  $0/1$  ثانیه به آن اعمال می‌شود و در زمان  $0/3$  ثانیه کاهش می‌یابد. در این تغییر بار به علت آنکه کنترل شار و گشتاور از هم جداست، مقدار شار ثابت باقی می‌ماند. در زمان  $0/5$  ثانیه فرمان کاهش شار اعمال می‌شود که گشتاور در این تغییر شار به علت پیش گفته ثابت می‌ماند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۹۵ -

شکل ۲۲: نتایج شبیه سازی کنترل موتور جدول به روش کنترل مستقیم گشتاور در سرعت نامی



شکل ۹۶ -

شکل ۲۳: مسیر تغییرات بردار شار استاتور در شکل در مدت زمان ۰/۳۵ تا ۰/۷۵ ثانیه

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تولید ولتاژ مورد نظر برای روش کنترل مستقیم گشتاور توسط کلیدزنی SPWM نیز امکان پذیر است. در این روش ولتاژ مطلوبی که معادل جداول مدولاسیون پهنای پالس دو سطحی است توسط تنظیم  $m$  و  $\theta$  موج سینوسی حامل در SPWM تولید می شود. به علت اینکه هدف اصلی این تحقیق بررسی سیستم کنترل WTDFIG، آن هم برای توربین های با اینرسی بالاست، می توان به جای هر دو روش کلیدزنی تنها از یک ضریب بهره استفاده کرد. بدین صورت تولید ولتاژ تغذیه رتور پس از اعمال فرمان توسط مدار کنترل آنی در نظر گرفته می شود چرا که زمان کلیدزنی اینورتر بسیار بالاتر از ثابت زمانی مکانیکی مجموعه است. (۲ میلی ثانیه در مقابل چند ثانیه)

### ۱-۱۶-۳-۲-۳. مقایسه کنترل جهت یابی میدان و کنترل مستقیم گشتاور

با توجه به توضیحات و نتایج شبیه سازی ارائه شده در دو بخش قبل، در مقایسه بین دو روش کنترل جهت یابی میدان رتور و کنترل مستقیم گشتاور می توان موارد جدول ۲ را لیست کرد.

جدول ۲: مقایسه روش های کنترل جهت یابی میدان رتور و کنترل مستقیم گشتاور

مورد مقایسه	DTC	FOC
جهت یابی میدان	نیاز نیست	لازم است
طرح کنترلی	ساده	پیچیده
کنترل جریان استاتور	لازم نیست	لازم است
پارامترهای مورد نیاز	$R_s$	$R_s, L_s, L_r, L_m, R_r$
حساسیت نسبت به تغییرات پارامترهای ماشین	نه خیلی حساس	حساس

با توجه به نتایج مقایسه روش های مختلف کنترل ماشین های القایی و در نظر گرفتن منحنی های عملکردی ماشین القایی تغذیه دوگانه، به خصوص وابستگی تغییرات به فاز نسبی ولتاژ تغذیه رتور به نظر می رسد که برای کنترل این نوع ماشین، به خصوص در مورد استفاده اتصال به توربین بادی و منحنی عملکردی مطلوب آن (شکل ۱-۱۷ و شکل ۱-۱۸) روش کنترل مستقیم گشتاور انتخاب مناسبی باشد.

## برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

### پیوست ۲. جعبه ابزار فازی MATLAB

اصول منطق فازی و استفاده از کنترل کننده‌های فازی در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، به همین خاطر در این قسمت وارد این توضیحات نشده و مسأله کاربردی استفاده از جعبه‌ابزار فازی **MATLAB** را مختصراً توضیح می‌دهیم.

برای استفاده از جعبه‌ابزار فازی **MATLAB** باید سه قسمت آشنا شویم. ۱. توابع عضویت، ۲. جدول قوانین و ۳. نحوه وارد کردن بلوک فازی در محیط سیمولینک. علاوه بر اینها لازم است نحوه عملکرد سیستم فازی به خوبی درک شده باشد تا بتوان ورودی‌های مناسب برای خروجی‌های لازم انتخاب شود. در این بخش تنها به معرفی ۳ مورد پیش گفته می‌پردازیم.

### ۱-۱۷-۱. توابع عضویت

تابع عضویت (**MF**) یک نمودار است که توصیف می‌کند هر نقطه از فضای ورودی چگونه به یک مقدار عضویت بین صفر و یک (درجه عضویت) تصویر شود. جعبه ابزار منطق فازی شامل یازده نوع تابع عضویت ساخته شده می‌باشد. این یازده نوع تابع از چند تابع اساسی تشکیل شده‌اند: توابع تکه‌ای خطی، توابع توزیع گوسی، نمودار هلالی (**Sigmoid**)، چند جمله‌ای درجه ۳ و چند جمله‌ای درجه ۴. انتخاب تابع عضویت مناسب با توجه به نقش سیستم فازی صورت می‌پذیرد. مثلاً اگر یک ورودی دو ارزشی باشد، مثلاً مقادیر بالاتر از **a** و کمتر از **a**، اما هدف این باشد که تغییرات آن به صورت پیوسته جابه‌جا شود، در این صورت استفاده از تابع عضویت هلالی مناسب است. دیگر توابع عضویت نیز هر کدام مانند این مورد در استفاده‌های خاص بسیار مناسب هستند. باید توجه داشت که انتخاب تابع عضویت مناسب بسیار مهم است. اصلاً ضرورت ندارد تعداد توابع عضویت یک ورودی زیاد باشد، مهم آن است که با توجه به مفهوم عملکرد سیستم فازی مورد نظر، تابع عضویت مناسب انتخاب شود. این مهم در مورد خروجی سیستم نیز باید مورد توجه قرار بگیرد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

## ۱-۱۸ - ۲. جدول قوانین

به هنگام طراحی یک سیستم فازی، مهمترین مسأله شناخت سیستم و انتخاب ورودی‌ها و خروجی‌های لازم است. سپس همزمان باید دو عمل صورت پذیرد، انتخاب تابع عضویت مناسب و تعیین نحوه ارتباط ورودی‌ها و خروجی‌ها که در جدول قوانین تنظیم می‌شود.

نرم افزار از دو روش و منطق مختلف برای برقراری این ارتباط استفاده می‌کند، روش ممدانی و روش سوگنو. روش استنتاج ممدانی معمولی‌ترین روش در منطق فازی است. این روش نخستین روشی بود که برای کنترل سیستم‌ها به کار گرفته شد. برای استفاده معمولی و مبتدی می‌توان از همین روش استفاده کرد.

## ۱-۱۹ - ۳. نحوه وارد کردن بلوک فازی در محیط سیمولینک

برای ساختن سیستم فازی تنها کافی است در صفحه اصلی نرم افزار دستور **fuzzy** اجرا شود. صفحه‌ای باز می‌شود که می‌توان هر سیستم فازی دلخواه با هر تعداد ورودی و خروجی و هر نوع تابع عضویت و جدول قوانین را به سادگی با آن طراحی کرد. برای ذخیره کردن این سیستم باید از منوی **File** گزینه **Export to Disk** انتخاب شود. فرض کنید فایل را با نام **b** ذخیره کنیم، فایلی با نام **b.fis** ساخته می‌شود.

در مدل سیمولینک ساخته شده، عنصر **Fuzzy Logic Controller** را از جعبه ابزار **Fuzzy Logic Toolbox** انتخاب کرده در محل مورد نظر قرار می‌دهیم. این عنصر یک ورودی و یک خروجی دارد پس برای موارد استفاده چند ورودی و چند خروجی باید از عناصر **mux** و **Demux** از قسمت **signdl Routing** استفاده کرد. پس از اتصال عنصر فازی به سیستم، باید نام یک فایل در آن وارد شود مثلاً **c**. این فایل، فایلی است که فایل فازی ساخته شده قبلی در فایل سیمولینک بدان شناخته می‌شود. برای فراخوانی فایل **b** ساخته شده در فایل **c** مورد استفاده در سیمولینک، باید در صفحه اصلی مدل ساخته شده، منوی **File** وارد قسمت **Model Properties / Callbacks** شد و دستور **c=readfis('b')** را وارد کرد. البته می‌دانیم که اسامی **c** و **b** کاملاً اختیاری است، تنها باید توجه داشت که **b** باید دقیقاً نام فایل فازی و **c** نام فایل وارد شده در عنصر فازی محیط سیمولینک باشد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

اگر لازم باشد برای طراحی و بهینه سازی مدل سیمولینک ساخته شده، تغییری در سیستم فازی داده شود و دوباره تحلیل انجام شود لازم نیست برای هر بار تغییر فایل سیستم فازی و فراخوانی آن در محیط مدل سیمولینک، مدل مربوطه بسته شده، تغییرات در فایل فازی داده شده، فایل فازی در **disk** ذخیره شود و مدل سیمولینک دوباره اجرا شود. در محیط ساختن فایل فازی در کنار گزینه **Export to Disk** گزینه **Export to Workspace** وجود دارد که با هر بار اعمال، سیستم فازی مورد استفاده در مدل سیمولینک مانند یک متغیر، مقدار جدید می یابد.

