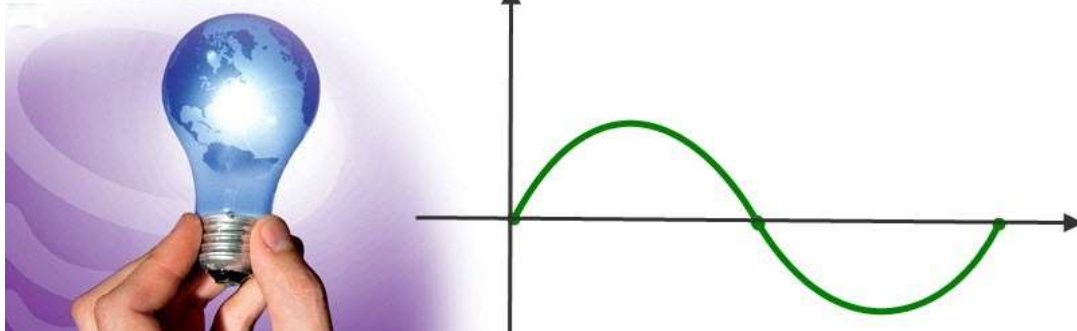


برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



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

جبران هارمونیک ها و عدم تعادل بار سیستم های حمل و نقل ریلی



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

(شماره پروژه = ۲۲۰)

پشتیبانی : ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

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

مقدمه

در این فصل یک روش کنترلی جدید را برای بهبود دهنده فعال توان و با استفاده از

PLL

(Phase Locked Loop) سه فاز ارائه می دهد . روش جدید مبتنی بر نظریه

اجزای متعامد جریان است و مشابه روش فوریه از ضرب داخلی سیگنالهای جریان

در سیگنالهایی سینوسی اما هم فاز با مؤلفه اصلی ولتاژ برای بدست آوردن مؤلفه

اکتیو آن استفاده می کند . به این ترتیب هارمونیکها، توالی منفی و توان راکتیو به

صورت یکجا جبران می شوند . در عین حال از غیرایده آل شدن ولتاژ منبع تحت

تأثیر قرار نمی گیرد . با شبیه سازی این روش در نرم افزار

MATLAB/SIMULINK صحت عملکرد آن در شرایط مختلف بار و منبع اثبات

شده است.

جبران سازی توان راکتیو، متعادل سازی بارهای غیر متقارن و همچنین ممانعت از

انتشار هارمونیکها در سیستم قدرت از جمله قابلیت های همزمان فیلتر اکتیو موازی

است . به همین دلیل این نوع فیلترها به نامهای (APC(Active Power

Conditioner یا APLC (Active Power Line Conditioner) نیز نامیده می

شوند.

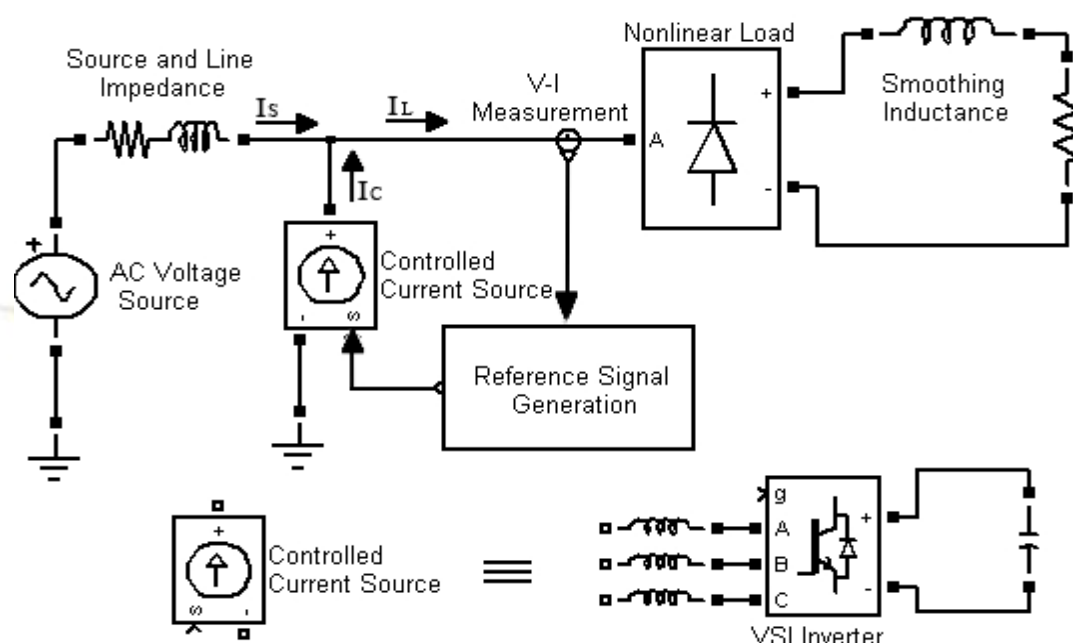
شکل ۱-۳ اصول عملکرد فیلتر اکتیو موازی را نشان می دهد. مطابق این شکل

فیلتر مانند یک منبع جریان کنترل شده عمل می کند که با نمونه برداری از جریان

بار و استخراج مؤلفه های نامطلوب آن، آنها را به شبکه تزریق می کند تا از جریان

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

منبع حذف شوند. سیگنالی که به منبع جریان اعمال می شود به نام سیگنال مرجع نام یده شده و حاوی مؤلفه های نامطلوب جریان بار است. محاسبه این سیگنال مهمترین بخش کنترلی فیلتر است و روشهای مختلفی برای آن در حوزه زمان و فرکانس ارائه شده است.



شکل ۳-۱- اصول عملکرد فیلتر اکتیو شنت

منبع جریان کنترل شونده معمولاً توسط اینورتر VSI پیاده سازی می شود. کنترل جریان خروجی نیز به روشهای مختلفی مانند هیستزیس، مدولاسیون پهنای پالس و مدولاسیون بردار فضایی ممکن است.

۳-۱-۱- مهمترین روشهای جبران سازی در حوزه زمان

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

تئوری pq از روشهای پر کاربرد حوزه زمان برای جبران سازی است که در سال ۱۹۸۳

توسط آکائی و همکارانش ارائه شد. مطابق این روش ولتاژها و جریانها با استفاده از

رابطه کلارک به مختصات ثابت ارجاع میشوند.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_0 & i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}^T &= C \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix}^T, \\ \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix}^T &= C \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix}^T \\ C &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

رابطه ۱-۳

سپس مقادیر p_0 ، p و q به نامهای توان توانی صفر، توان حقیقی لحظه ای و توان

موهومی لحظه ای به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_0 & 0 & 0 \\ 0 & e_\alpha & e_\beta \\ 0 & -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

رابطه ۲-۳

هر یک از این توانها دارای مقادیر ثابت و نوسانی هستند:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, q = \bar{q} + \tilde{q}, p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$$

رابطه ۳-۳

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

برای جبران هارمونیکها، توان راکتیو و توالی منفی و جریان نوترال بار لازم است p_0 ، \tilde{p} و q جبران شوند. لذا با رابطه جریانهای مرجع برای جبرانسازی آنها محاسبه می شوند:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} e_0 & 0 & 0 \\ 0 & e_\alpha & e_\beta \\ 0 & -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -p_0 \\ -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix}$$

رابطه ۳-۴

برای جداسازی \tilde{p} معمولاً ترجیح داده می شود که ابتدا p^- توسط یک فیلتر dc جدا شده و از کل توان لحظه ای p کم شود. فیلتر dc می تواند به صورت آنالوگ یا با متوسط گیری در حوزه زمان با یک پنجره لغزشی پیاده سازی شود. استفاده از پنجره لغزشی پاسخ سریعتری را دارد و برای یک حالت کلی بار نامتعادل دارای هارمونیک زوج لازم است طول پنجره برابر یک سیکل فرکانس قدرت باشد. لذا پس از هر بار تغییر بار، حداقل یک سیکل زمان لازم است تا با استفاده از روش pq سیگنال مرجع بدست آید. در زمانی که منبع غیرایده آل شود لازم است FFPS ولتاژ منبع به جای سیگنالهای ولتاژ در رابطه ۳-۱ استفاده شود. استخراج FFPS ولتاژ به روشهای مختلفی ممکن است از جمله روشی را با استفاده از یک PLL سه فاز بر مبنای تئوری pq ارائه کرده است.

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

یک روش پرکاربرد دیگر ارجاع جریانهای سه فاز به مختصات سنکرون است. در این مختصات FFPS جریان تبدیل به مقادیر dc می شود که با فیلتر کردن از سایر مؤلفه ها جدا می شود.

$$\begin{bmatrix} i_0 & i_d & i_q \end{bmatrix}^T = P \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix}^T$$

رابطه ۳-۵

و:

$$P = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\alpha t) & \cos(\alpha t - 2\pi/3) & \cos(\alpha t + 2\pi/3) \\ -\sin(\alpha t) & -\sin(\alpha t - 2\pi/3) & -\sin(\alpha t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

رابطه ۳-۶

برای جبران هارمونیکها و توالی منفی لازم است مقادیر نوسانی id و iq جداسازی و جبران شوند. همچنین اگر قاب دوار انتخابی هم فاز با FFPS ولتاژها باشد، با جبران iq توان راکتیو نیز جبران می شود. بدین منظور لازم است فاز FFPS ولتاژ با استفاده از یک PLL سه فاز استخراج و در ماتریس تبدیل پارک در رابطه ۳-۵ و ۳-۶ استفاده شود:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} -i_0 \\ -\tilde{i}_d \\ -i_q \end{bmatrix}$$

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

رابطه ۳-۷

از دیگر روشهای جبرانسازی، شناسایی بار سه فاز است. در این روشها ابتدا توان اکتیو بار سه فاز (P^-) اندازه گیری می شود. این مقدار با محاسبه توان لحظه ای و متوسط گیری از آن طی یک سیکل فرکانس قدرت بدست می آید:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_T (v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t)) dt$$

رابطه ۳-۸

سپس یک کندکتانس معادل برای هر فاز محاسبه می شود:

$$G = \frac{P}{V_{\Sigma}^2}, V_{\Sigma} = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$$

رابطه ۳-۹

در رابطه ۳-۹، V_a ، V_b و V_c مقادیر مؤثر ولتاژهای فازی هستند. جریانهای

جبرانسازی از رابطه ۳-۱۰ محاسبه می شوند:

$$i_{ca} = Gv_a(t) - i_a(t)$$

$$i_{cb} = Gv_b(t) - i_b(t)$$

$$i_{cc} = Gv_c(t) - i_c(t)$$

رابطه ۳-۱۰

مشابه روش pq در اینجا نیز در زمان غیرایده آل شدن ولتاژ منبع باید به کمک یک

PLL سه فاز FFPS آن استخراج و در رابطه ۳-۸ به جای ولتاژهای سه فاز

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

استفاده شود. در مجموع روشهایی که در حوزه زمان ارائه می شوند یک ویژگی مشترک دارند و آن جداسازی مؤلفه سینوسی اکتیو جریان و سپس جبران سایر مؤلفه ها است. این مؤلفه هم فاز با FFPS ولتاژ منبع است به همین دلیل در روش dq و همچنین در روشهای مبتنی بر توان با منبع غیرایده آل لازم است فاز FFPS با یک PLL سه فاز استخراج و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۱-۲- ارائه روش جدید

اگر $x(t)$ سیگنالی متناوب در حوزه زمان شامل مجموعی از سینوسها با فرکانسهای مختلف و فرکانس اصلی ω باشد، آنگاه هارمونیک اول این سیگنال قابل تجزیه به دو جزء متعامد در راستاهای $\sin(\omega t)$ و $\cos(\omega t)$ می باشد. اگر سیگنال مذکور یک جریان غیرسینوسی باشد، مؤلفه اکتیو این جریان مؤلفه ای با فرکانس ω و در راستای مؤلفه اصلی ولتاژ منبع است. مثلاً اگر ولتاژ منبع در راستای $\sin(\omega t)$ دامنه مؤلفه اکتیو جریان (a) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$a = \frac{2}{T} \int_T x(t) \sin(\omega t) dt, \quad T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

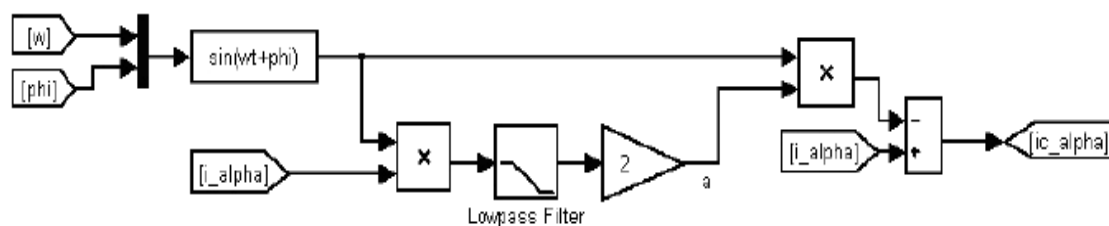
رابطه ۳-۱۱

به این ترتیب اگر FFPS ولتاژ منبع در محور α در راستای $\sin(\omega t + \phi)$ باشد که م قادر فرکانس و فاز قبلاً استخراج شده اند، شکل ۲ بلوک دیاگرام پیشنهادی

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

استخراج سیگنال مرجع جبران سازی هارمونیکها و توان راکتیو را در فاز مذکور نشان

می دهد.



شکل ۳-۲- بلوک دیاگرام استخراج سیگنال مرجع برای فاز α

رابطه ۳-۱۱ در حقیقت ضرب داخلی دو تابع را بیان می نماید که در بسط فوریه نیز

مورد استفاده قرار می گیرد. اما در اینجا برای مشخص نمودن مقدار سیگنال جریان

در یک راستای مشخص (که همان ولتاژ منبع است)، در بردار یکه آن راستا ضرب

شده است. این مقدار مؤلفه سینوسی اکتیو جریان است و با سایر مؤلفه های

جریان (توان راکتیو و هارمونیکها) متعامد است. لذا سایر مؤلفه ها در این ضرب

داخلی حذف می شوند.

شکل ۳-۳ بلوک دیاگرام استخراج سیگنال مرجع را برای حالت سه فاز نشان می

دهد. مطابق این شکل ابتدا جریانهای سیستم با استفاده از رابطه ۳-۱ به مختصات

ثابت ارجاع می شوند. اگر ωt فاز FFPS ولتاژ منبع استخراج شده با یک PLL

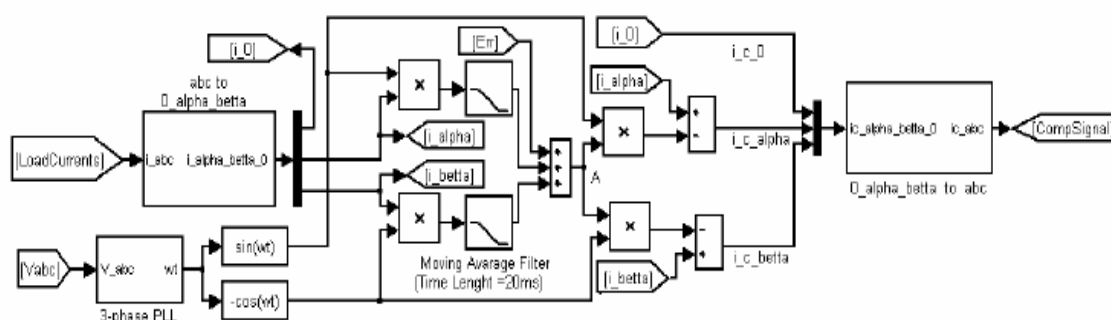
سه فاز باشد، آنگاه $\sin(\omega t)$ و $-\cos(\omega t)$ راستاهای مؤلفه اصلی ولتاژ فازهای

α و β در مختصات ثابت هستند. سپس به کمک رابطه ۳-۱۱ دامنه های مؤلفه های

اکتیو سینوسی جریان در فازهای α و β محاسبه می شوند. برای متعادل سازی بار دو فاز

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

لازم است دامنه جریانهای اکتیو در دو فاز با میانگین گیری برابر شود. در اینجا نصف دامنه هر فاز محاسبه و با هم جمع شده تا دامنه جریان مطلوب منبع در مختصات دوفاز بدست آید.



شکل ۳-۳- بلوک دیاگرام پیشنهادی برای استخراج سیگنال مرجع سه فاز

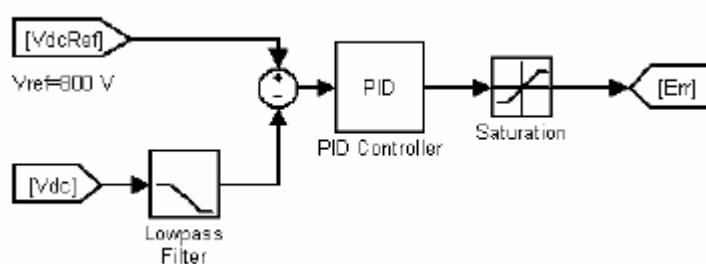
برای کنترل ولتاژ خازن، به دامنه مطلوب جریانها یک سیگنال خطای باس dc هم اضافه می شود. به این ترتیب فیلتر مقدار جریان اکتیو بار را با خطا می بیند و با تبادل انرژی با شبکه مقدار ولتاژ خازن را تنظیم می کند. استخراج سیگنال خطای باس dc توسط یک کنترلر مطابق شکل ۳-۴ صورت می گیرد. در این کنترلر ابتدا ولتاژ خازن از یک فیلتر پایین گذر عبور داده می شود تا ریپل ناشی از نامتعادل یا هارمونیک بودن بار حذف شود. سپس با مقدار مرجع مقایسه و پس از عبور از یک کنترلر PID سیگنال کنترلی باس dc محاسبه می شود. پس از اضافه شدن سیگنال خطای باس dc به دامنه ها، مقدار دامنه مطلوب که با A نشان داده شده است در $\sin(\omega t)$ و $-\cos(\omega t)$ ضرب می شود تا سیگنالهای جریانهای مطلوب منبع بدست آیند. از کم کردن این سیگنالها از جریانهای بار ($i\alpha$ و $i\beta$) و جریانهای جبران سازی

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

فازهای α و β و $(i_{ca}$ و $i_{c\beta})$ بدست می آیند. جبران جریان نوترال به صورت مستقل از هارمونیکها و توالی منفی صورت می گیرد. به این ترتیب جریانهای جبرانسازی در مختصات abc با تبدیل معکوس کلارک بدست می آید:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}$$

رابطه ۳-۱۲

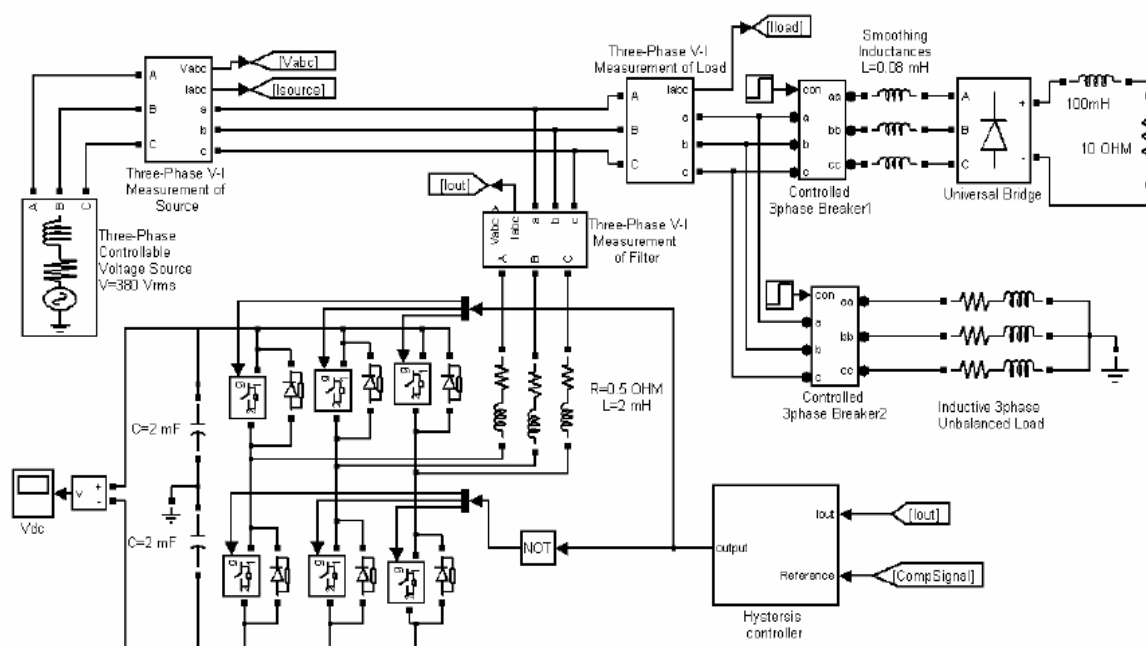


شکل ۳-۴- محاسبه سیگنال جبرانسازی باس dc

۳-۱-۳- نتایج شبیه سازی

شکل ۳-۵ مدار شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB/SIMULINK را نشان می دهد. از یک اینورتر با شش سوئیچ و با خازن تقسیم شده برای تزریق جریان جبرانسازی استفاده شده است. کنترل جریان خروجی با روش هیستریزیس و با تثبیت فرکانس کلیدزنی در ۲۵ کیلوهرتز انجام می شود. بار غیرخطی یک یکسوساز دیودی با سلف بزرگ موازی با یک بار سلفی نامتعادل خطی میباشد.

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

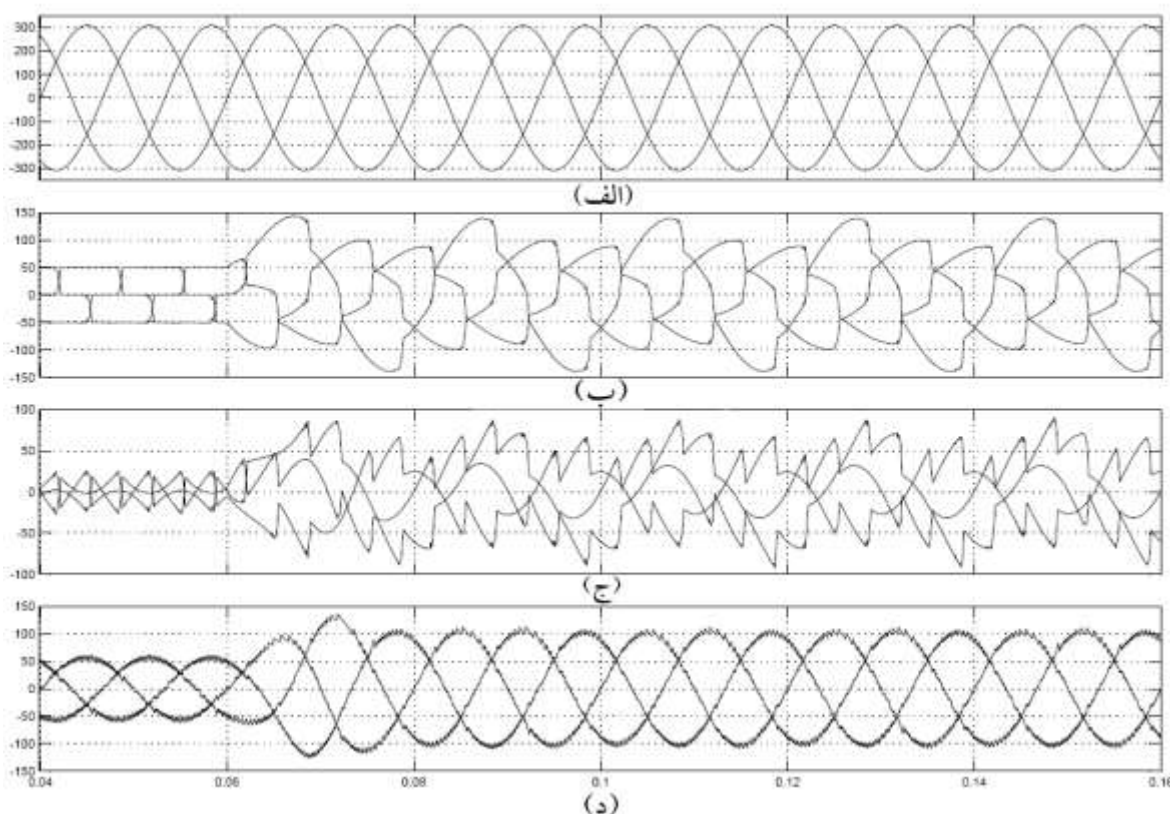


شکل ۳-۵- مدار شبیه سازی شده

در شبیه سازی اول منبع متعادل سینوسی و بار غیر خطی متعادل است و در شکل ۳-۶ جریانهای بار سلفی نامتعادل به آن اضافه می شود. در شکل ۳-۶ جریانهای سیستم و در شکل ۳-۷ تغییرات ولتاژ خازن در زمان تغییر بار دیده می شوند. از بار نامتعادل غیرخطی تمام مؤلفه های نامطلوب شامل هارمونیکها، توالی منفی و توان راکتیو از جریان منبع حذف شده است و مقدار THD از حدود ۲۰٪ در جریان بار به ۵٪ در جریان منبع کاهش یافته است. در زمان تغییر بار ولتاژ خازن دچار افت می شود اما کنترلر ولتاژ خازن به خوبی آنرا جبران می کند. پس از نامتعادل شدن بار این ولتاژ دچار نوسان می شود.

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

استخراج سیگنال مرجع پس از هر بار تغییر بار یک سیکل (معادل ۲۰ میلی ثانیه) به طول می انجامد که به دلیل استفاده از متوسط گیری در حوزه زمان است.



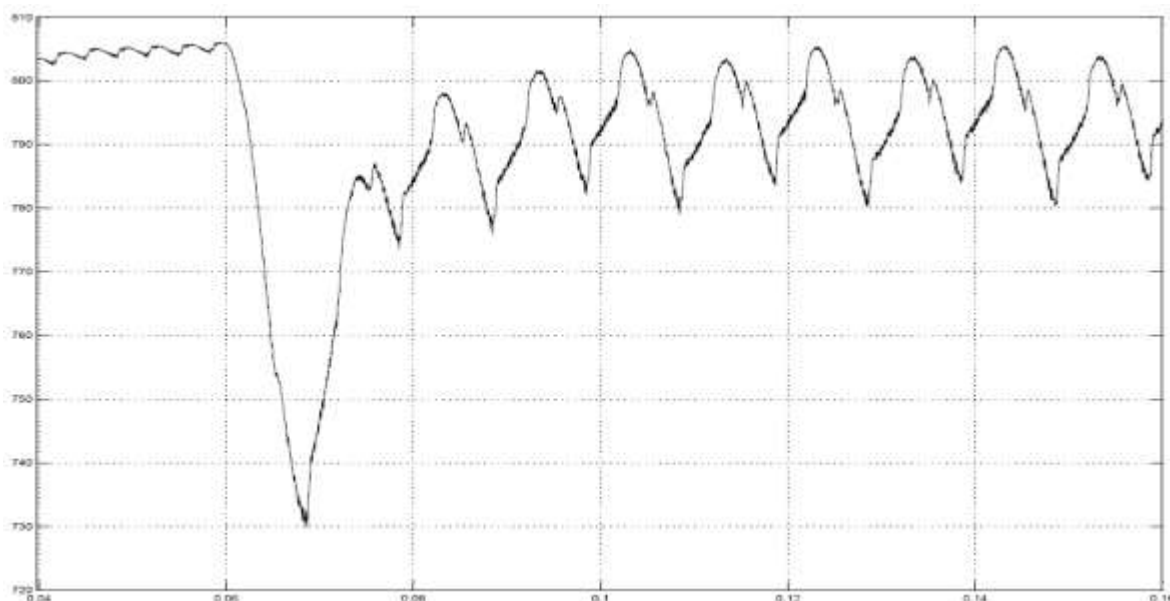
شکل ۳-۶- نتایج جبران سازی با روش ارائه شده: الف - ولتاژ سه فاز، ب- جریانهای

بار سه فاز،

ج - سیگنالهای مرجع جبران سازی، د- جریان منبع. در $t=0.06$ بار به صورت

نامتعادل افزایش می یابد.

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



شکل ۳-۷- تغییرات ولتاژ خازن در زمان تغییر و نامتعادل شدن بار سیستم

در شبیه سازی دوم اثر غیرایده آل شدن ولتاژ منبع بر جبران سازی بررسی می شود . در ابتدا ولتاژ منبع متعادل است اما در $t=0.06$ هارمونیک شده معادله مؤلفه های اصلی ولتاژها به صورت زیر در می آیند:

$$v_a(t) = 0.9 * 220\sqrt{2} \sin(100\pi t)$$

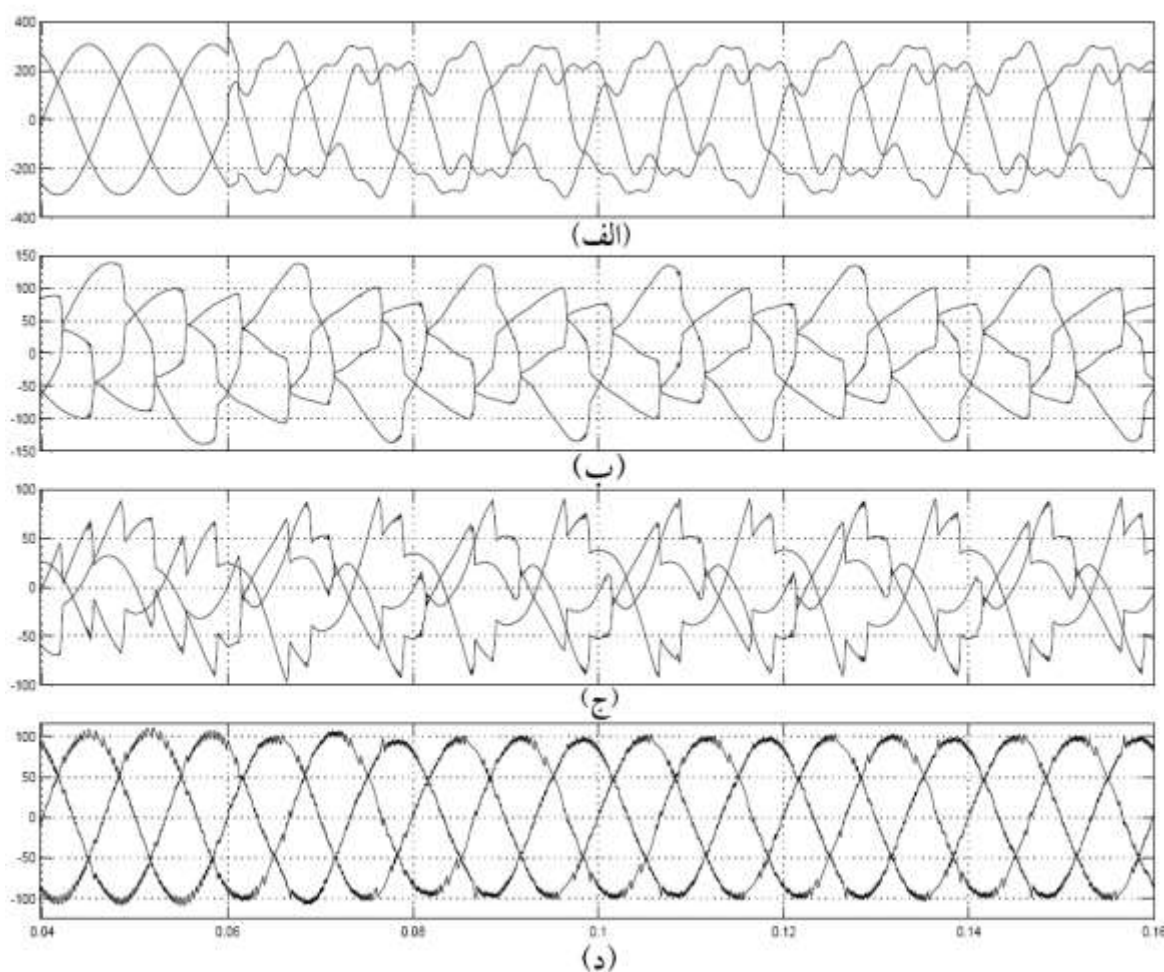
$$v_b(t) = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t - 2\pi/3 - \pi/10)$$

$$v_c(t) = 0.8 * 220\sqrt{2} \sin(100\pi t - 4\pi/3 + \pi/8)$$

رابطه ۳-۱۲

در شکل ۳-۸ جریانهای سیستم در این حالت دیده می شوند . در اینجا فیلتر در حال جبران سازی یک بار غیرخطی نامتعادل است اما در اثر غیرایده آل شدن منبع جبران سازی دچار اختلال نشده است.

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



شکل ۳-۸- نتایج جبران سازی با روش ارائه شده: الف- ولتاژ سه فاز، ب- جریانهای

بار نامتعادل سه فاز، ج- سیگنالهای مرجع جبران سازی، د- جریان منبع. در $t=0.06$

منبع هارمونیکی و نامتعادل می شود.

۳-۱-۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این بخش از خاصیت متعامد بودن مؤلفه های جریان استفاده شد و بر مبنای آن

روشی برای استخراج سیگنال مرجع جبران سازی با قابلیت جبران توان راکتیو، توالی

منفی و جریان نوترال برای بار سه فاز ارائه گردید. به این ترتیب که ابتدا با استفاده

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

از یک PLL سه فاز راستای ولتاژهای سه فاز منبع مشخص می شود و سپس کلیه مؤلفه های غیرهمراستای آن در جریان بار حذف می گردند. شبیه سازیها نشان داد که روش مذکور در جبران سازی بار دارای کارایی مناسبی بوده و نسبت به غیرایده آل شدن ولتاژ منبع مقاوم است.

۳-۲- شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیک در سیستمهای توزیع با استفاده از مشخصه هارمونیک بارها و روش تجزیه مقادیر ویژه

به منظور کاهش اعوجاجات هارمونیک، لازم است محل منابع هارمونیک شناسایی، و جریان آنها از جریان جذب شده توسط بارهای خطی متصل به نقطه اتصال مشترک تفکیک شود. از اختلاف مشخصه $V-I$ بارهای خطی و غیر خطی، می توان برای مدلسازی، شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیک استفاده نمود. برای تعیین پارامترهای مدل، روش هایی چون تخمین حداقل مجموع مربعات وجود دارد. به دلایل مختلف ممکن است معادله اندازه گیری سینگیولار شود و با استفاده از معادلات نرمال تخمین حداقل مجموع مربعات هیچ پاسخی بدست نیاید. در این بخش، در ابتدا مدلسازی، شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیک با استفاده از مشخصه ولتاژ-جریان بارهای غیرخطی بیان می شود و سپس روشی بر اساس تخمین حداقل مجموع مربعات و تجزیه مقادیر ویژه برای تعیین پارامترهای مدل، پیشنهاد می گردد. برای بررسی اعتبار روش، شبکه ۱۰ شینه IEEE شبیه سازی شده است. بر اساس نتایج، مدل استفاده شده نسبت به مدل های دیگر دقت بیشتری دارد و فقط با استفاده از اندازه گیر یهای انجام شده و بدون نیاز به

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

اطلاعاتی از مشخصات بارها، محل منابع هارمونیکی تعیین و جریان آنها در بار مرکب تفکیک میشود. همچنین در صورت سینگیولار شدن معادله اندازه گیری، روش پیشنهادی پاسخ مطلوبی را می دهد. بر اساس مطالعات انجام شده، هارمونیک ها باعث مشکلات مختلفی نظیر افزایش حرارت و خرابی تجهیزات، عملکرد اشتباه رله های حفاظتی و تجهیزات کنترلی میشوند. برای تعیین ولتاژهای هارمونیکی، علاوه بر جریان های بارهای غیر خطی، به مقدار جریان بارهای خطی نیز نیاز است. برای کاهش موثر اعوجاجات هارمونیکی، علاوه بر شناسایی محل منابع هارمونیکی، لازم است جریان این منابع از جریان جذب شده توسط بارهای خطی متصل به نقطه اتصال مشترکشان تفکیک شود. در طرح های اخیر برای کنترل هارمونیک ها، به جای قطع مصرف کننده ای با سطوح هارمونیکی بیشتر از قیود تعریف شده در استانداردها، روشی مبنی بر جریمه کردن آنها متناسب با سطوح هارمونیکی شان ارایه شده است. ولی برای استفاده از این طرح، ضروری است سهم بارهای خطی و غیر خطی در جریان های هارمونیکی اندازه گیری شده مشخص شود.

اولین روش ارایه شده برای شناسایی منابع هارمونیکی، روش جهت توان اکتیو است. این روش به دلیل وابستگی به زاویه بین منابع، برای شناسایی منابع هارمونیکی نامطمئن است. در به ترتیب شاخص هایی بر اساس اصول مداری جمع آثار و جهت توان راکتیو برای شناسایی و تعیین میزان مشارکت منابع هارمونیکی بیان شده است. در این روش ها برای مدلسازی بار مرکب، از مدار معادل نورتن استفاده شده است و همانگونه که در قسمت نتایج نشان داده می شود این روش دقت چندانی

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

ندارد. در روشی بر اساس اختلاف مشخصه V-I بارها و تخمین حداقل مجموع مربعات برای شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیکی ارایه شده است. ولی همانگونه که در این بخش نشان داده خواهد شد؛ ممکن است معادله اندازه گیری سینگیولار شده و هیچ پاسخی بدست نیاید. بنابراین ضروری است روشی کارآمد در این زمینه بیان شود.

در این قسمت، در ابتدا مدلسازی، شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیکی موجود در بار مرکب با استفاده از مشخصه ولتاژ-جریان بارها بیان می شود. سپس روشی ترکیبی بر اساس تخمین حداقل مجموع مربعات و تجزیه مقادیر ویژه برای تعیین پارامترهای مدل، پیشنهاد می گردد.

۳-۲-۱- شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیکی بر اساس مشخصه ولتاژ -

جریان بارها

در اینجا فرض های زیر در نظر گرفته می شود:

ولتاژها و جریان های بار، شکل موجهایی متناوب با دوره تناوب T بوده و میتوانند

مطابق زیر به فرم سری فوریه بیان شوند:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}V_h \sin(2\pi h t / T + \theta_h)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(2\pi h t / T + \phi_h)$$

رابطه ۳-۱۳

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

بنابراین کلیه اجزای ولتاژها و جریانها مطابق زیر به فرم فازوری بیان می شوند:

$$\begin{aligned} V_{hr} + jV_{hi} &= V_h \angle \theta_h \\ I_{hr} + jI_{hi} &= I_h \angle \Phi_h, \quad h=1,2,3,\dots,n \end{aligned}$$

رابطه ۳-۱۴

در طول دوره ای که عمل شناسایی انجام می شود، بار مرکب ساکن است، یعنی ترکیب و مشخصات مداری کلیه بارهای آن تغییر نمی یابد.

بر اساس مشخصه V-I بارهای غیر خطی، جریان های هارمونیک در آنها با کلیه ولتاژهای هارمونیک تغذیه شان (از جمله ولتاژ فرکانس اصلی) ارتباطی غیر خطی دارد. بنابراین جریان های هارمونیک بخش غیر خطی بار مرکب (با زیرنویس N) می تواند با معادله زیر نمایش داده شود:

$$i_N(t) = f(v(t))$$

رابطه ۳-۱۵

این جریان ها می توانند بصورت فازوری نیز نمایش داده شوند:

$$I_{Nh} = \begin{bmatrix} I_{Nhr}(V_1, V_{2r}, V_{2i}, \dots, V_{nr}, V_{ni}) \\ I_{Nhi}(V_1, V_{2r}, V_{2i}, \dots, V_{nr}, V_{ni}) \end{bmatrix}, \quad h=2,3,\dots,n$$

رابطه ۳-۱۶

در رابطه ۳-۱۶، زمان اولیه شکل موج ولتاژ بگونه ای انتخاب می شود که زاویه فاز θ_1 برابر صفر شده و نتیجتاً $V_{1i}=0$ ، $V_{1r}=0$ شوند. مشخصه V-I بخش خطی در

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

بار مرکب (با زیر نویس L) می تواند با ادمیتانس معادل هارمونیک ی اش، $Y_{Lh} =$

$G_{Lh} + jB_{Lh}$ نشان داده شود. بنابراین کل جریان هارمونیک جذب شده توسط

بخش خطی به صورت زیر توصیف می شود:

$$I_{Lh} = \begin{bmatrix} I_{Lhr} \\ I_{Lhi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{Lh} & -B_{Lh} \\ B_{Lh} & G_{Lh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{hr} \\ V_{hi} \end{bmatrix}, \quad h = 2, 3, \dots, n$$

رابطه ۳-۱۷

با استفاده از رابطه ۳-۱۶ و ۳-۱۷ کل جریان هارمونیک جذب شده به وسیله بار

مرکب بصورت زیر بیان می شود:

$$I_h = \begin{bmatrix} I_{hr} \\ I_{hi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Lhr} \\ I_{Lhi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{Nhr}(V_1, V_{2r}, V_{2i}, \dots, V_{nr}, V_{ni}) \\ I_{Nhi}(V_1, V_{2r}, V_{2i}, \dots, V_{nr}, V_{ni}) \end{bmatrix}, \quad h = 2, 3, \dots, n$$

رابطه ۳-۱۸

به دلیل غیر خطی بودن مشخصه $V-I$ منابع هارمونیک، معادله ۳-۱۸ نمی تواند

بطور مستقیم استفاده شود. برای عملی کردن این کار، در مقاله های گذشته روش

های مختلفی برای مدلسازی منابع هارمونیک بیان شده است. در بارهای غیر

خطی، به ترتیب به صورت منابع جریان ثابت و مدار معادل نورتن مدل شده اند. از

آنجایی که این مدل ها دارای دقت کافی نیستند، مدلی کارآمد نیاز است. از دید

مهندسی، بطور معمول تغییرات V_{hr} و V_{hi} در محدوده $\pm 3\%$ و تغییرات V_1 در

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

محدوده ۵٪ ولتاژ اسمی باس می باشند. با در نظر گرفتن چنین محدوده ولتاژی،

رابطه خطی زیر برای تقریب مشخصه منابع هارمونیکی استفاده می شود:

$$I_{Nh} = \begin{bmatrix} a_{h0} + a_{h1}V_1 + a_{h2r}V_{2r} + a_{h2i}V_{2i} + \dots + a_{hmi}V_{ni} \\ b_{h0} + b_{h1}V_1 + b_{h2r}V_{2r} + b_{h2i}V_{2i} + \dots + b_{hmi}V_{ni} \end{bmatrix}$$

$h = 2, 3, \dots, n$

رابطه ۳-۱۹

لذا کل جریان هارمونیکی بار مرکب برابر می شود با:

$$I_h = \begin{bmatrix} G_{Lh} & -B_{Lh} \\ B_{Lh} & G_{Lh} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{h0} + a_{h1}V_1 + a_{h2r}V_{2r} + a_{h2i}V_{2i} + \dots + a_{hmi}V_{ni} \\ b_{h0} + b_{h1}V_1 + b_{h2r}V_{2r} + b_{h2i}V_{2i} + \dots + b_{hmi}V_{ni} \end{bmatrix}$$

$h = 2, 3, \dots, n$

رابطه ۳-۲۰

مشاهده می شود که اختلاف واضحی بین مشخصه V-I منابع هارمونیکی و بارهای

خطی وجود دارد. جزء جریان هارمونیکی در بارهای خطی، منحصرأ بر اساس ولتاژ

تغذیه هارمونیکی هم رتبه شان تعیین می شود. در حالی که، هر جزء جریان

هارمونیکی بارهای غیرخطی، علاوه بر ترم ایجاد شده بوسیله ولتاژ تغذیه هم رتبه

شان، شامل یک ترم ثابت و ترم های ایجاد شده به وسیله کلیه مرتبه های ولتاژهای

هارمونیکی و ولتاژ فرکانس اصلی نیز می باشند.

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

اگر جزئی از جریان هارمونیک بار غیر خطی که فقط به ولتاژ هارمونیک هم رتبه اش وابسته است، از جریان بار غیرخطی صرف نظر و به جریان هارمونیک بخش خطی اضافه شود، معادله ۳-۱۹ به صورت زیر تقریب زده می شود:

$$I'_{Nh} = \begin{bmatrix} a_{h0} + a_{h1}V_1 + \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq h}}^n a_{hkr}V_{kr} + a_{hki}V_{ki} \\ b_{h0} + b_{h1}V_1 + \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq h}}^n (b_{hkr}V_{kr} + b_{hki}V_{ki}) \end{bmatrix}$$

$$I''_{Nh} = \begin{bmatrix} a_{hhr} & a_{hhi} \\ b_{hhr} & b_{hhi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{hr} \\ V_{hi} \end{bmatrix}$$

$$I'_{Lh} = I_{Lh} - I''_{Nh} = \begin{bmatrix} a'_{hhr} & a'_{hhi} \\ b'_{hhr} & b'_{hhi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{hr} \\ V_{hi} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a'_{hhr} & a'_{hhi} \\ b'_{hhr} & b'_{hhi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{Lh} & -B_{Lh} \\ B_{Lh} & G_{Lh} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{hhr} & a_{hhi} \\ b_{hhr} & b_{hhi} \end{bmatrix},$$

$$h = 2, 3, \dots, n$$

رابطه ۳-۲۱

لذا کل جریان هارمونیک بار مرکب برابر می شود با:

$$I_h = I_{Lh} - I_{Nh} = I'_{Lh} - I'_{Nh} = \begin{bmatrix} a'_{hhr} & a'_{hhi} \\ b'_{hhr} & b'_{hhi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{hr} \\ V_{hi} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} a_{h0} + a_{h1}V_1 + \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq h}}^n a_{hkr}V_{kr} + a_{hki}V_{ki} \\ b_{h0} + b_{h1}V_1 + \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq h}}^n (b_{hkr}V_{kr} + b_{hki}V_{ki}) \end{bmatrix}, \quad h = 2, 3, \dots, n$$

رابطه ۳-۲۲

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

بنابراین با تقریب بالا، اجزاء $I' Lh$ و $I' Nh$ به ترتیب جریان های بخش های خطی و غیر خطی در جریان هارمونیک h -ام بار مرکب هستند. عبارت $I' Nh=0$ به معنای عدم وجود منبع هارمونیک و عبارت $I' Nh \neq 0$ به معنای وجود منبع هارمونیک در بار مرکب است.

۳-۲-۲- الگوریتم شناسایی

به منظور استفاده از رابطه ۳-۲۲، لازم است پارامترهای آن تعیین شوند. این پارامترها را می توان به صورت ماتریس های زیر در نظر گرفت:

$$C_{hr} = [a_{h0} \ a_{h1} \ a_{2r} \ a_{2i} \ \dots \ a'_{hhr} \ a'_{hhi} \ \dots \ a_{hnr} \ a_{hni}]$$

$$C_{hi} = [b_{h0} \ b_{h1} \ b_{2r} \ b_{2i} \ \dots \ b'_{hhr} \ b'_{hhi} \ \dots \ b_{hnr} \ b_{hni}]$$

برای این منظور، در دوره زمانی کوتاهی که بار مرکب ساکن است، شرایط ولتاژی مختلفی را برای بار مرکب ایجاد کرده و ولتاژها و جریان های هارمونیک بار مرکب اندازه گیری می شود. برای تغییر ولتاژ تغذیه بار مرکب، می توان از روش هایی چون قطع و وصل خازن های موازی و یا تغییر تپ ترانس ها استفاده نمود. سپس روش تقریب حداقل مجموع مربعات برای تخمین پارامترهای مدل، استفاده می شود. الگوریتم این روش به صورت زیر خلاصه میشود:

(۱) برای m مرتبه ($m \geq 2n$) شرایط ولتاژی مختلفی را برای بار مرکب ایجاد کرده و

ولتاژها و جریان های فرکانس اصلی و هارمونیک به صورت فازورهای

$$(k = 1, 2, \dots, m, h = 1, 2, \dots, n) \quad I_h^{(k)} \angle \phi_h^{(k)} \quad V_h^{(k)} \angle \theta_h^{(k)}$$

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

اندازه گیری می شوند.

(۲) برای $(k=1,2,\dots,m)$ ، زاویه فاز فرکانس اصلی را به صفر انتقال داده و سپس

کلیه ولتاژها و جریان های هارمونیک، متناظر با آن تغییر داده می شوند:

$$\begin{aligned} V_{1r}^{(k)} &= V_1^{(k)} & V_{1i}^{(k)} &= 0 \\ V_{hr}^{(k)} &= V_h^{(k)} \cos(\theta_h^{(k)} - h\theta_1^{(k)}) \\ V_{hi}^{(k)} &= V_h^{(k)} \sin(\theta_h^{(k)} - h\theta_1^{(k)}) \\ I_{hr}^{(k)} &= I_h^{(k)} \cos(\phi_h^{(k)} - h\phi_1^{(k)}) \\ I_{hi}^{(k)} &= I_h^{(k)} \sin(\phi_h^{(k)} - h\phi_1^{(k)}), \quad (h = 2,3,\dots,n) \end{aligned}$$

(۳) اگر ماتریسهای \mathbf{X} ، \mathbf{W}_{hr} و \mathbf{W}_{hi} بصورت زیر تعریف شوند:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^{(k)} &= [V_1^{(k)} \ V_{2r}^{(k)} \ V_{2i}^{(k)} \ \dots \ V_{hr}^{(k)} \ V_{hi}^{(k)} \ \dots \ V_{nr}^{(k)} \ V_{ni}^{(k)}]^T \\ \mathbf{X} &= [\mathbf{V}^{(1)} \ \mathbf{V}^{(2)} \ \dots \ \mathbf{V}^{(m)}] \\ \mathbf{W}_{hr} &= \begin{bmatrix} I_{hr}^{(1)} & I_{hr}^{(2)} & \dots & I_{hr}^{(m)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{W}_{hi} &= \begin{bmatrix} I_{hi}^{(1)} & I_{hi}^{(2)} & \dots & I_{hi}^{(m)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات، که

$$\sum_{k=1}^m (I_{hi}^{(k)} - C_{hi} V^{(k)})^2 \quad \text{و} \quad \sum_{k=1}^m (I_{hr}^{(k)} - C_{hr} V^{(k)})^2$$

را حداقل می کند؛ می توان پارامترهای \mathbf{C}_{hr} و \mathbf{C}_{hi} را به صورت زیر بدست آورد:

$$\begin{aligned} C_{hr} &= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}_{hr} \\ C_{hi} &= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}_{hi} \end{aligned}$$

رابطه ۳-۲۳

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

(۴) با جایگذاری مقادیر بدست آمده برای Chr و Chi در رابطه ۳-۲۲، مقادیر I'_{Lh} و I'_{Nh} را برای هر هارمونیک بدست آورده، که نتیجتاً وجود منبع هارمونیکی مشخص شده و جریان های هارمونیکی آن تفکیک می شوند.

۳-۲-۳- حل معادله تخمین پارمترها به روش SVD

مواقعی پیش می آید که به دلیل سینگیولار شدن معادله اندازه گیری، هیچ جوابی با استفاده از معادلات نرمال (رابطه ۳-۲۳) بدست نمی آید. در حالی که در چنین شرایطی، روش SVD علاوه بر مشخص کردن حالت های مشاهده ناپذیر، تخمین مطلوبی را می دهد.

روش SVD ماتریس H، با ابعاد $m \times n$ صورت حاصل ضرب سه ماتریس تبدیل می کند:

$$H = UWVT$$

رابطه ۳-۲۴

که U و VT ماتریس هایی متعامد، با ابعاد $m \times m$ و $n \times n$ می باشند. ستونهای U، بردارهای ویژه ماتریس HHT، ستونهای VT بردارهای ویژه HTH هستند. همچنین W، با ابعاد $m \times n$ ، ماتریسی قطری با عناصر غیر منفی و کاهشی است که درایه های آن مقادیر ویژه ماتریس H می باشند. تعداد پاسخ های چنین معادلاتی برابر است با:

$$[x] = [x_p] + \sum_{i=1}^{n-\text{rank}(H)} k_i [x_{ni}]$$

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

رابطه ۲۵-۳

که x_p پاسخی خاص k_i مقداری ثابت و x_{ni} بردار فضائی خنثی می باشد. اگر همه بردارهای فضائی خنثی در نقطه مشخصی (مربوط به متغیر حالت خاصی) عناصری صفر داشته باشند؛ هیچ ترکیب خطی از بردارهای فضائی خنثی نمی تواند مقدار آن را در پاسخ ویژه اش تغییر دهد و می توان آن متغیر حالت را مشاهده پذیر در نظر گرفت.

با جایگذاری تجزیه SVD ماتریس اندازه گیری در معادله (۳-۲۳)، رابطه زیر بدست می آید:

$$X = (UWV^T \quad VW^T U^T)^{-1} (VW^T U^T) Z$$

رابطه ۲۶-۳

روابط زیر برای ماتریس های متعامد، برقرار است:

$$U^T U = I, \quad V^{-T} = (V^T)^{-1} = (V^T)^T = V$$

رابطه ۲۷-۳

با جایگذاری روابط ۲۶-۳ و در، رابطه ۲۷-۳ مقدار X بر ابر خواهد شد با:

$$X = VS^{-1}U^T Z$$

رابطه ۲۸-۳

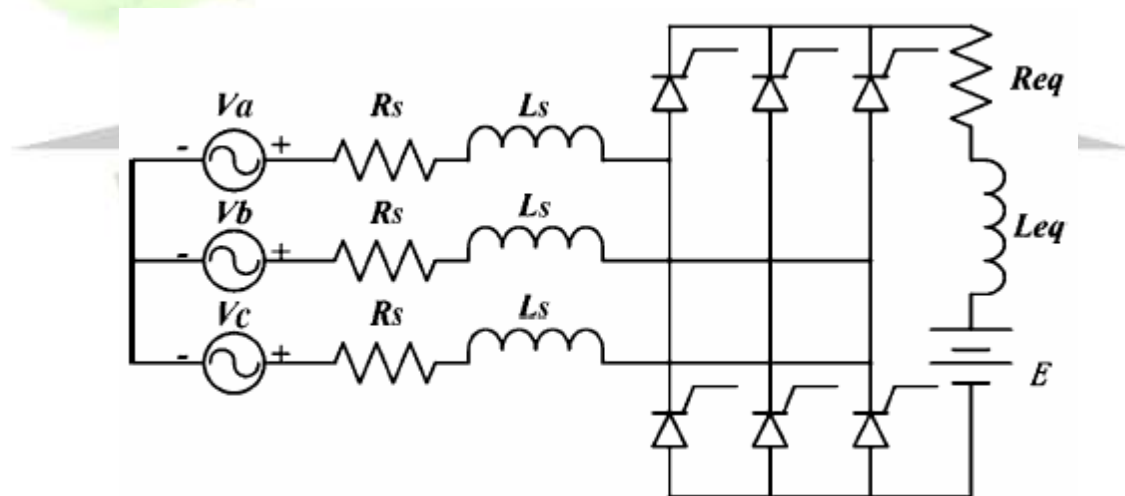
برای سیستم های زیرمعیین و کاملاً معین نیز رابطه ۲۸-۳ برقرار است.

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

۳-۲-۴- بررسی نتایج شبیه سازی

بررسی دقت مدل

در این قسمت، برای نشان دادن اعتبار مدل ارایه شده برای منابع هارمونیکی، بار یکسوکننده شش پالسه سه فاز شبیه سازی می شود. دیاگرام این یکسوکننده در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. مدل ارایه شده در به عنوان مدل واقعی در نظر گرفته می شود. حال روش های مختلف مدلسازی منابع هارمونیکی (منبع جریان ثابت، مدار معادل نورتن و مدل ارائه شده در این فصل)، برای این نوع بار غیر خطی شبیه سازی شده و دقت آنها با یکدیگر مقایسه می شود.



شکل ۳-۹- دیاگرام یکسوکننده شش پالسه سه فاز

برای نقاط کار مختلف، خطاهای بین مقادیر تخمین زده شده با استفاده از هر مدل و

مقادیر واقعی، برای پارامترهای I_{h1} ، I_{hr} و I_h محاسبه شده و در جدول (1)

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

نشان داده شده است، به طوری که μ_{hr} ، μ_{hi} ، μ_h مقادیر متوسط و σ_{hr} ، σ_{hi} ، σ_h واریانس خطاها می باشند.

جدول ۳-۱- خطاهای مدل های مختلف برای یکسوکونده شش پالس

سه فاز

شاخص خطاها (%)	مدل منبع جریان ثابت	مدل مدار معادل نورتن	مدل پیشنهادی
μ_{5r}	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۰۱
μ_{5i}	۰/۷۱	-۰/۴۹	-۰/۰۸
μ_{5a}	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۰
σ_{5r}	۲/۶۳	۲/۲۹	۰/۱۶
σ_{5i}	۴/۶۹	۳/۱۵	۰/۵۵
σ_{5a}	۲/۳۶	۲/۳۰	۰/۰۸
μ_{7r}	۲/۰۱	۱/۶۱	۰/۱۱
μ_{7i}	۱/۹۷	۱/۳۲	۰/۱۱
μ_{7a}	۰/۹۱	۰/۴۹	۰/۰۳
σ_{7r}	۸/۵۰	۵/۶۰	۱/۰۰
σ_{7i}	۹/۰۱	۵/۵۱	۰/۹۹
σ_{7a}	۵/۸۷	۳/۲۴	۰/۳۷

مطابق جدول ۳-۱، مدل ارایه شده نسبت به دو مدل دیگر خطای کمتری دارد،

بنابراین مدلی دقیقتر می باشد.

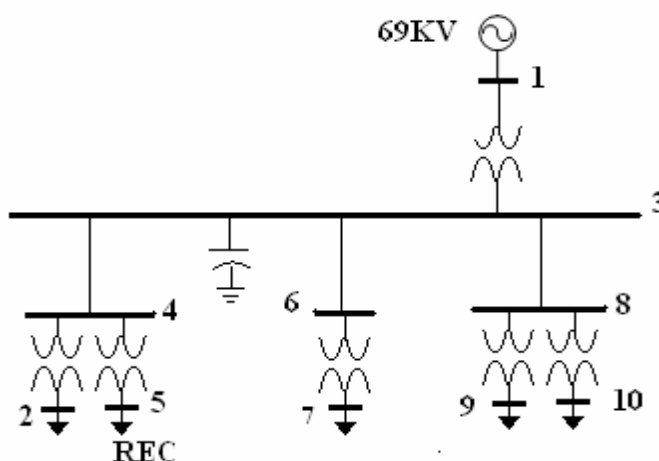
۳-۲-۵- بررسی کارآیی روش پیشنهادی در شناسایی و تفکیک جریان منابع

هارمونیک

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

در این قسمت برای بررسی کارآیی روش پیشنهادی در شناسایی و تفکیک جریان منابع هارمونیک، شبکه ۱۰ شینه IEEE شبیه سازی می شود. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده و کلیه اطلاعات آن مطابق با است.

با قرار دادن اندازه گیر هارمونیک در شین های چهارم و پنجم، ولتاژها و جریان های هارمونیک برای نقاط کاری مختلف اندازه گیری می شوند. سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، بخشهای خطی و غیر خطی جریان در هر هارمونیک تعیین و از مقایسه با مقادیر واقعی (نتایج سیمولینک مطلب)، کارآیی آن بررسی می شود. در جداول ۳-۲ و ۳-۳ مقادیر واقعی، نتایج بدست آمده با استفاده از روش پیشنهادی و همچنین خطاهای آنها نسبت به مقادیر واقعی برای جریان های هارمونیک شین های چهارم و پنجم نشان داده شده است. لازم به ذکر است که، به دلیل نزدیکی مقادیر اندازه گیری شده به یکدیگر، با استفاده از معادلات نرمال هیچ تخمینی برای پارامترها بدست نمی آید؛ در صورتی که روش SVD تخمین مطلوبی را بدست می دهد.



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

شکل ۳-۱۰-۳ دیاگرام شبکه ۱۰ شینه IEEE

جدول ۳-۲- نتایج اجرای روش در شین چهارم از شبکه ۱۰ شبکه

شماره هارمونیک	نتایج سیمولینک MATLAB		نتایج روش پیشنهادی		خطا (%)	
	I_{Nh}	I_{Lh}	I_{Nh}	I_{Lh}	I_{Nh}	I_{Lh}
	۵	۵۲/۳۷	۵/۳۱۷	۵۱/۵	۵/۳۷۶	۱/۵۲
۷	۲۱/۲۴	۲/۳۴۰	۲۰/۹۲	۲/۳۹	۱/۴۶	۱/۲۸
۱۱	۹/۷۶۷	۱/۱۱۴	۹/۶۳	۱/۱۲۶	۱/۳۲	۱/۱۷
۱۳	۷/۳۵۴	۰/۸۶۲	۷/۲۲	۰/۸۴۷	۱/۷۸	۱/۶۵
۱۷	۲/۱۴۱	۰/۵۶۱	۲/۱۰۰	۰/۵۵۱	۱/۹	۱/۷۳

جدول ۳-۳- نتایج اجرای روش در شین پنجم از شبکه ۱۰ شبکه

شماره هارمونیک	نتایج سیمولینک مطلب		نتایج روش پیشنهادی		خطا (%)	
	I_{Nh}	I_{Lh}	I_{Nh}	I_{Lh}	I_{Nh}	I_{Lh}
	۵	۷/۶۵	۰/۰۰	۷/۵۴	۰/۲۱	۱/۳۲
۷	۳/۶۲	۰/۰۰	۳/۵۶	۰/۰۱۲	۱/۴۰	-
۱۱	۲/۳۰	۰/۰۰	۲/۲۶	۰/۰۰۸	۱/۵۶	-
۱۳	۱/۵۲	۰/۰۰	۱/۴۹	۰/۰۰۲	۱/۴۳	-
۱۷	۰/۸۹۰	۰/۰۰	۰/۸۷	۰/۰۰۰۶	۱/۸۷	-

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

در شین چهارم که شامل بار مرکب است، با استفاده از روش پیشنهادی با خطایی حداکثر برابر ۲٪ بخشهای خطی و غیر خطی جریان بار مرکب تفکیک می شوند. همچنین در شین پنجم، وجود غیرخطی و اندازه جریان های هارمونیک آن با دقت خوبی (خطایی حداکثر برابر ۲٪) تشخیص داده می شود.

۳-۲-۶- نتیجه گیری

در این بخش، از مشخصه V-I بارهای خطی و غیرخطی، برای مدلسازی و شناسایی منابع هارمونیک استفاده می شود. نتایج زیر از شبیه سازی های انجام شده بدست می آید:

- (۱) مدل ارایه شده نسبت به مدل های دیگر دقت بیشتری دارد.
- (۲) روش پیشنهادی، به خوبی منابع هارمونیک را شناسایی کرده و با خطایی حداکثر برابر ۲٪ بخشهای خطی و غیر خطی را در بار مرکب تفکیک می کند. در حالی که روش های دیگر خطای بیشتری دارند.
- (۳) زمانی که معادله اندازه گیری سینگیولار م ی شود، با استفاده از معادلات نرمال هیچ پاسخی بدست نمی آید؛ در صورتی که در چنین شرایطی، روش SVD پاسخ قابل قبولی را می دهد.

۳-۳- ارایه الگوریتمی برای جبران همزمان هارمونیکها و عدم تعادل بار شبکه تغذیه سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی AC تکفاز

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

مقدمه

سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی بدلیل استفاده از کانورترهای الکترونیک قدرت و عملکرد تکفاز موجب آلودگی هارمونیکی و عدم تعادل (کاهش کیفیت برق) در شبکه تغذیه خود می شوند. در بخش حاضر الگوریتم جبران عدم تعادل و هارمونیک ها به صورت همزمان با استفاده از فیلتر اکتیو هایبرید ارائه گردیده است. نشان داده شده است که الگوریتم ارائه شده برای هر نوع اتصال ترانسفورماتور تغذیه قابل اجرا می باشد. خصوصیت دیگر جبران ساز بکارگیری آن در سمت بار است که بدون نیاز به ترانسفورماتور کوپلینگ نصب می گردد. این امر هزینه کلی جبران سازی را کاهش می دهد. سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی برای کاهش بار ترافیکی در سطح شهرهای بزرگ مورد استفاده قرار می گیرند. سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی از جهات مختلف قابل طبقه بندی هستند یکی از روش های طبقه بندی با توجه به ساختار شبکه تغذیه سیستمهای حمل و نقل ریلی الکتریکی می باشد؛ سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی از جهت تغذیه به دو نوع تقسیم بندی می شوند: سیستم تغذیه AC تکفاز با سطح ولتاژ ۲۰ kV یا ۲۵۰ kV و سیستم تغذیه با خط DC با سطوح ولتاژ ۷۵۰ ولت، ۱۵۰۰ ولت و ۳۰۰۰ ولت.

سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی بدلیل استفاده از یکسوسازهای الکترونیک قدرت کیفیت توان شبکه تغذیه خود را تحت تاثیر قرار می دهند. مهمترین اثرات کیفیت توانی سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی AC تزریق جریان های آلوده به هارمونیک به شبکه و نیز عدم تعادل بار آن به دلیل عملکرد تکفاز در شبکه می

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

باشد. در این بخش، الگوریتم جبران هارمونیک و عدم تعادل بار به صورت همزمان برای هر آرایش قابل استفاده ترانسفورماتور در سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی ارایه گردیده است. از مشخصات اصلی این الگوریتم جبران عدم تعادل و هارمونیک های جریان بار و بهبود کیفیت برق در نقطه اتصال مشترک (PCC) می باشد که قابل طرح برای هر اتصال استفاده شده از ترانسفورماتور نیز می باشد. این الگوریتم با استفاده از روابط منطقی و محاسبات ساده قابل اجرا است. جبران هارمونیک ها و عدم تعادل بار سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی تکفاز به کمک جبران ساز متصل به سمت فشار متوسط ترانسفورما تور تغذیه ۱، برای سمت فشار قوی (نقطه اتصال مشترک) انجام می گردد و با استفاده از ترانسفورماتور کوپلینگ تکفاز جبران سازی را انجام می دهد. که این روش جبران سازی به کاهش هزینه کلی جبران ساز می انجامد. در این بخش همچنین محدودیت های اجرایی از نظر فرکانس سوئیچینگ در جبران ساز مدنظر قرار گرفته است، همچنین برای نشان دادن قابلیت الگوریتم، جبران ساز با ساختار ساده در نظر گرفته شده و همچنین جبران سازی در شبکه غیر مستحکم نیز آزمایش شده است. جبران ساز و سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی در نرم افزار ATP/EMTP شبیه سازی شده است.

۳-۳-۱- ساختار فیلتر اکتیو

فیلترهای اکتیو از دو بخش قدرت و کنترل تشکیل یافته اند. بخش قدرت هر فیلتر اکتیو از تعدادی سوئیچ نیمه هادی که قابلیت سوئیچینگ در فرکانس های بالا را دارند مانند GTO، IGBT و یا IGCT و همچنین یک عنصر ذخیره کننده انرژی

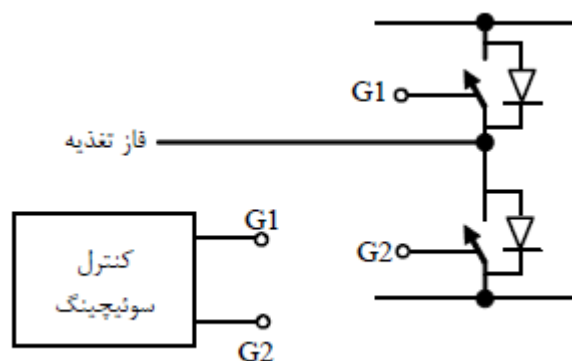
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

که یک خازن یا یک سلف بزرگ است تشکیل می یابد. این فیلترها اگر به صورت موازی به شبکه متصل گردند به عنوان منبع ولتاژ قابل کنترلی عمل می کنند که جریان مورد نیاز جبران سازی را به مدار تزریق می کنند و در صورتی که به صورت سری در مدار قرار گیرند به عنوان منبع جریان قابل کنترلی عمل می کنند که ولتاژ دو سر خود را به گونه ای تنظیم می نمایند که جبران سازی صورت پذیرد.

بخش کنترل فیلتر اکتیو از دو قسمت تشکیل می یابد که قسمت اول عمل تشخیص شکل موج های مرجع برای جبران سازی را انجام می دهد که در این بخش الگوریتم جبران سازی نامیده می شود. و بخش دیگر بر اساس شکل موج مرجع الگوی سوئیچینگ را برای سوئیچ های نیمه هادی ایجاد میکند.

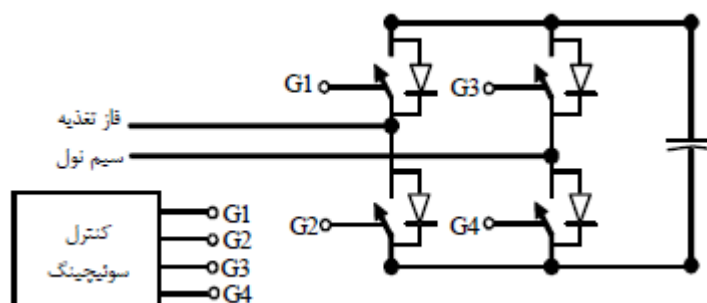
۳-۲- ساختار قدرت فیلتر اکتیو

ساده ترین ساختار برای فیلتر اکتیو استفاده از دو سوئیچ برای هر فاز می باشد که هر سوئیچ هدایت در نصف پریود را بر عهده دارد. این دو سوئیچ سری را در اینجا یک پایه فاز می نامیم. شکل ۳-۱۱ شماتیک یک پایه فاز را که از دو سوئیچ ایده آل و دیوید آنتی پارالل تشکیل شده نشان می دهد.



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

شکل ۳-۱۱- شماتیک پایه فاز



شکل ۳-۱۲- ساختار قدرت فیلتر اکتیو برای یکی از فازها

در صورتی که علاوه بر سیم فاز، سیم نول نیز داشته باشیم یک پایه فاز برای سیم

نول نیز نیاز خواهیم داشت تا هارمونیک های جریان جبران گردد.

در این قسمت با توجه به اینکه تاکید اصلی بر الگوریتم جبران سازی می باشد، لذا

ساختار قدرت استفاده شده برای فیلتر اکتیو از دو پایه فاز برای هر یک از فازها

تشکیل شده است. شکل ۳-۱۲ ساختار قدرت فیلتر اکتیو برای یکی از فازها را

نشان میدهد. فاز دیگر نیز ساختار مشابهی دارد.

۳-۳-۳- الگوی سوئیچینگ

برای سوئیچ زنی سوئیچ های نیمه هادی قدرت در هر فاز الگوریتم جبران سازی و

الگوی سوئیچینگ بر اساس الگوریتم نیاز است. الگوریتم جبران سازی در بخش

بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت، در این بخش به ساختار الگوی سوئیچینگ می

پردازیم.

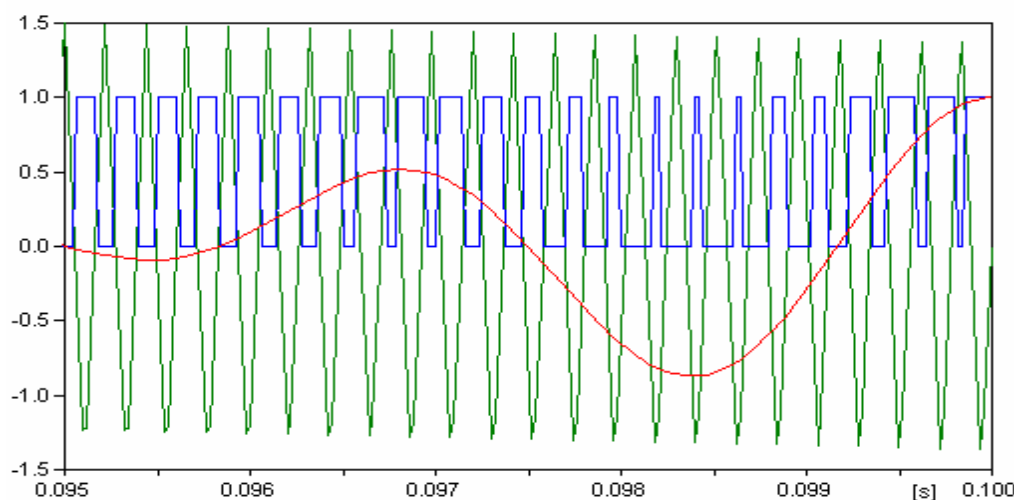
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بر اساس شکل موج مرجع حاصل از الگوریتم جبران سازی دو روش عمده برای ایجاد الگوی سوئیچینگ وجود دارد. الگوی اول استفاده از روش مدولاسیون پهنای پالس با فرکانس ثابت (PWM) و الگوی دوم استفاده از باند هیستریزس جریان می باشد. در این جا از الگوی PWM متداول با فرکانس سوئیچینگ ثابت برای جبران سازی استفاده شده است.

در روش PWM با فرکانس سوئیچینگ ثابت جریان مرجع حاصل از الگوریتم جبران سازی با شکل موج مثلثی یا دندان اره ای با فرکانس سوئیچینگ مورد نظر مقایسه می گردد به عبارت دیگر فرکانس شکل موج مثلثی یا دندان اره ای برابر فرکانس سوئیچینگ خواهد بود. با توجه به اینکه جبران سازی برای چه منظوری استفاده می گردد نتیجه مقایسه به سیگنال سوئیچینگ تبدیل می گردد.

در صورتی که بخواهیم خروجی فیلتر اکتیو جریانی با فاز مخالف شکل موج مرجع باشد هر جا که شکل موج مثلثی بزرگتر از شکل موج مرجع گردید سیگنال آتش برای سوئیچ بالای پایه فاز ایجاد می گردد. برای سوئیچ پایینی پایه فاز نیز به صورت عکس عمل می گردد. شکل ۳-۱۳ ایجاد سیگنال سوئیچینگ را برای سوئیچ بالایی نشان می دهد.

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



شکل ۳-۱۳- الگوی سوئیچینگ برای هدایت سوئیچ بالایی پایه فاز (شکل موج

پالسی مربعی)

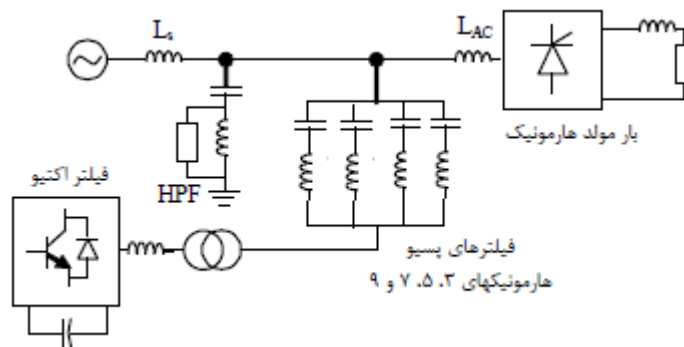
در جاهایی که سوئیچ ها خاموش هستند عمل هدایت را یا دیودهای آنتی پارالل بر عهده دارند و یا عمل هدایت از عنصر ذخیره کننده انرژی به سمت خروجی فیلتر صورت نمی پذیرد. بدین ترتیب فیلتر اکتیو عمل جبران سازی خود را تکمیل می نماید.

۳-۳-۴- فیلتر اکتیو هایبرید

برای عمل جبران فرکانس سوئیچینگ باید به گونه ای انتخاب گردد که از بزرگترین فرکانس هارمونیک که جبران می گردد بیش از ۱۰ برابر بزرگتر باشد. در صورتی که بخواهیم تا هارمونیک مرتبه پنجاهم را جبران نماییم نیاز به سوئیچ های یی خواهیم داشت که در ولتاژ و جریان مورد نظر بتوانند با فرکانس ۲۷ kHz سوئیچ گردند تا عمل جبران سازی به خوبی انجام پذیرد. با توجه به اینکه در شبکه های توزیع

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

هارمونیک های بالاتر از مرتبه سیزدهم از اهمیت کمتری برخوردارند استفاده از سوئیچ هایی با این قابلیت از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست . لذا برای کاهش هزینه ها در سیستم جبران ساز از فیلترهای اکتیو هایبرید استفاده می شود. فیلترهای اکتیو هایبرید از یک بخش اکتیو و از یک بخش پسیو تشکیل می یابند. بخش اکتیو فیلتر معمولا هارمونیک های مراتب پایین و دامنه بزرگتر را جبران سازی می کند و برای بقیه مراتب هارمونیک بالاتر از یک فیلتر بالاگذر به صورت موازی با بخش اکتیو فیلتر استفاده می گردد. جبران مراتب هارمونیک خاص توسط فیلتر اکتیو را اصطلاحا جبران هارمونیک انتخابی می نامند. شکل ۳-۱۴ شماتیک فیلتر اکتیو هایبرید استفاده شده در اینجا را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۴- شماتیک فیلتر هایبرید بکار گرفته شده

۳-۳-۵- الگوریتم جبران سازی پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی از دو بخش اصلی تشکیل یافته است؛ بخش اول میزان عدم تعادل بار را تشخیص داده و جریان جبران سازی لازم را برای جبران عدم تعادل بار مشخص می کند و بخش دوم الگوریتم از روش جبران هارمونیک انتخابی کمک می

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

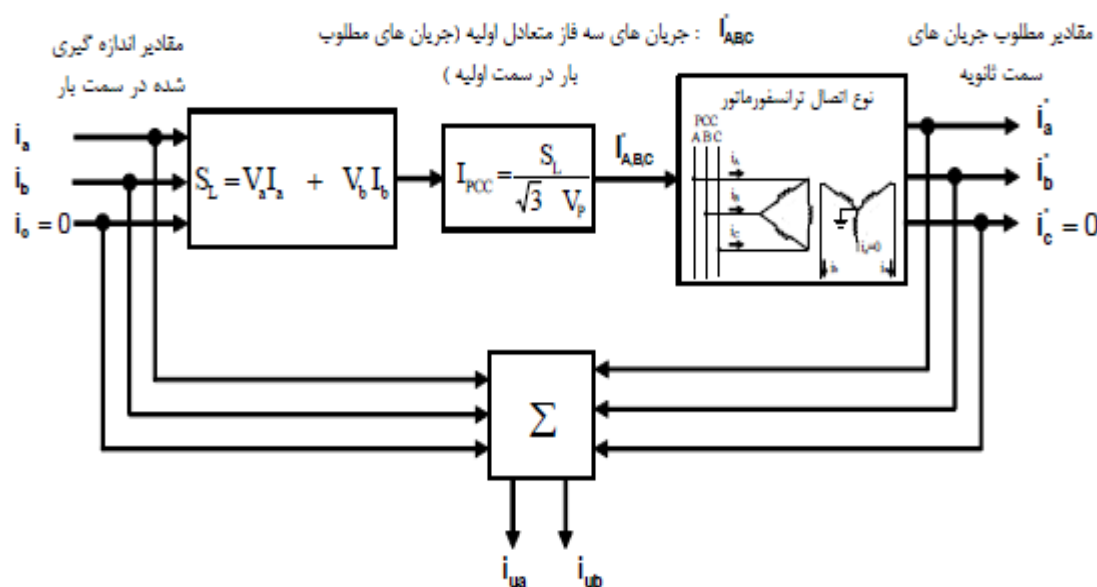
گیرد که تنها هارمونیک های با دامنه بزرگتر و مراتب پایین را مد نظر قرار داده و باعث کاهش هزینه جبران ساز می گردد. بقیه هارمونیک های مرتبه بالا نیز با استفاده از یک فیلتر بالاگذر پسیو جبران میشود.

۳-۳-۵-۱- الگوریتم جبران عدم تعادل بار

الگوریتم استفاده شده در این جا بر محاسبه جریان متعادل در سمت اولیه ترانسفورماتور به عنوان نقطه اتصال مشترک سیستم و استخراج جریان جبران ساز نصب شده در سمت ثانویه ترانسفورماتور استوار است. دو شبکه تکفاز که توسط ترانسفورماتور از سه فاز تغذیه می گردد باعث ایجاد عدم تعادل بار در سمت سه فاز ترانسفورماتور می گردد. در الگوریتم پیشنهادی مقدار جریان های ثانویه تراانسفورماتور در هر دو فاز اندازه گیری شده و توسط آن دیماندر توان دریافتی از شبکه حاصل می گردد. در صورتی که تلفات ترانسفورماتور را کوچک فرض کرده و از آن صرفنظر کنیم این توان باید توسط شبکه سه فاز تامین گردد. لذا می توان با توجه به دیماندر توان، جریان های سه فاز متعادل اولیه را برای تامین توان بار محاسبه کرد. برای اینکه جریان های سه فاز متعادل در اولیه ترانسفورماتور دیده شوند با توجه به نوع اتصال ترانسفورماتور جریا نهی دوفاز سمت ثانویه محاسبه می گردند. اختلاف بین جریان های بار و جریان های محاسبه شده در سمت ثانویه ترانسفورماتور جریا نهی مرجع جبران سازی را می سازند. بدین ترتیب با تزریق اختلاف دو جریان توسط فیلتر اکتیو، جریانی را که ترانسفورماتور خواهد دید جریان های محاسبه شده ای خواهند بود که به متعادل شدن بار در سمت اولیه

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

ترانسفورماتور منجر می گردند. شکل ۳-۱۵ الگوریتم محاسبه جریان مرجع برای جبران عدم تعادل بار در ترانسفورماتور DYn را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۵- محاسبه جریان مرجع برای جبران عدم تعادل بار برای اتصال DYn

روابط زیر نحوه محاسبه جریان مرجع جبران عدم تعادل بار برای ترانسفورماتور با اتصال DYn را نشان می دهند. برای انواع دیگر اتصال ترانسفورماتور، این روابط با توجه به نوع اتصال آنها و معادلات حاکم بر توان های سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قابل محاسبه است. برای سادگی در روابط زیر فرض شده نسبت تبدیل برابر یک است و همچنین ضریب توان بار برابر یک فرض شده است.

$$S_L = V_a I_a + V_b I_b$$

$$I_{PCC} = \frac{S_L}{\sqrt{3} V_p}$$

رابطه ۳-۲۹

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

که در آن V_a ، V_b ، I_a و I_b مقادیر موثر ولتاژ و جریان سمت ثانویه و VP ولتاژ سمت اولیه ترانسفورماتور می باشند.

با توجه به اتصال ترانسفورماتور و نیز اینکه در این اتصال فاز c بدون بار می باشد جریان های اولیه ترانسفورماتور را می توان با روابط زیر بر حسب جریان های ثانویه نوشت:

$$\begin{aligned} \bar{i}_c &= 0 \\ \bar{i}_A &= \bar{i}_a - \bar{i}_c = \bar{i}_a \\ \bar{i}_B &= \bar{i}_b - \bar{i}_a \\ \bar{i}_C &= \bar{i}_c - \bar{i}_b = -\bar{i}_b \end{aligned}$$

رابطه ۳-۳۰

که در آن i_A, i_B, i_C جریان های سمت اولیه و i_a, i_b, i_c جریان های سمت ثانویه ترانسفورماتور می باشد که از رابطه (۲) دامنه جریان های اولیه برابر $IPCC$ می باشد. از رابطه ۳-۳۰ برای جریان های سمت ثانویه بعد از جبران سازی داریم:

رابطه ۳-۳۱

$$\begin{aligned} \bar{i}_a^* &= i_A \\ \bar{i}_b^* &= -i_C \end{aligned}$$

که در آن i_a و i_b جریان های مطلوب سمت ثانویه ترانسفورماتور برای جبران عدم تعادل بار و رسیدن به جریان های متعادل اولیه i_A, i_B, i_C می باشد.

در نتیجه اگر جریان های ثانویه دارای مقادیر محاسبه شده i_b و i_a باشند اولیه جریان م تعادل با دامنه $IPCC$ خواهد بود. به این ترتیب جریان های جبران ساز مناسب را می توان با روابط زیر محاسبه کرد.

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

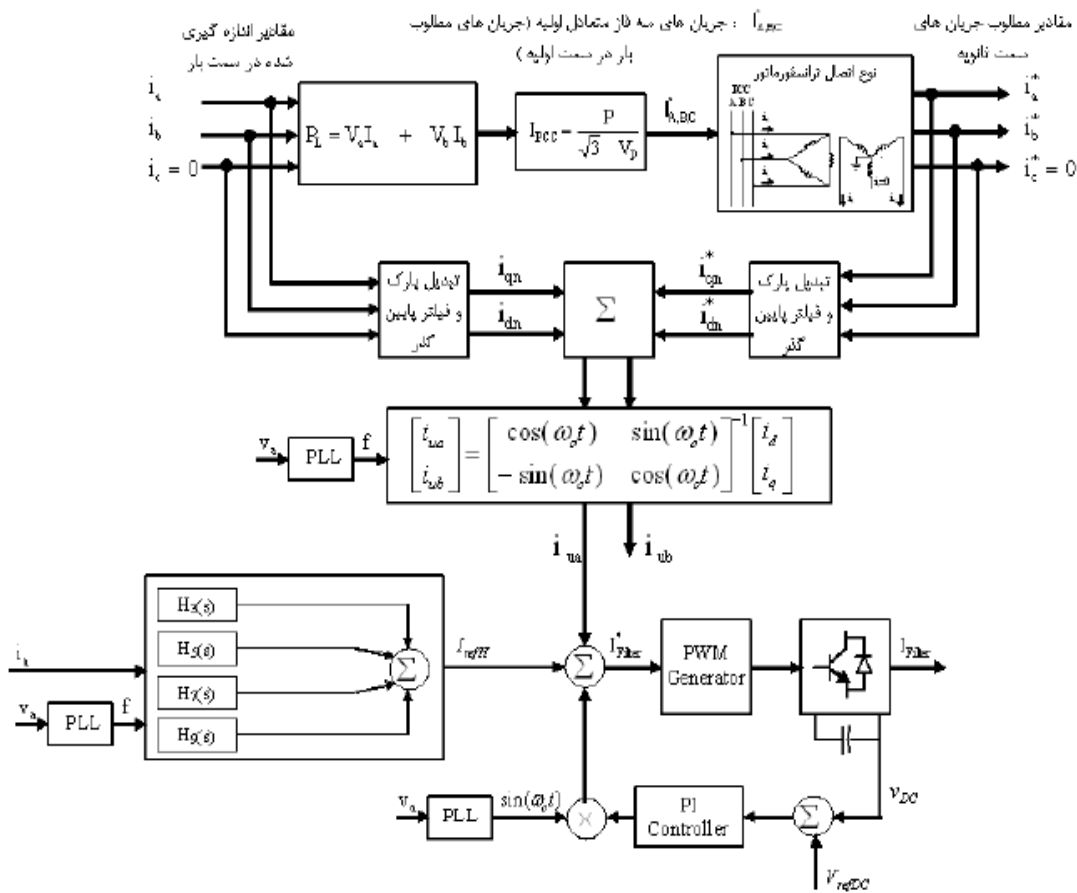
$$\begin{aligned} i_{ua} &= i_a^* - i_a \\ i_{ub} &= i_b^* - i_b \end{aligned}$$

رابطه ۳-۳۲

با استفاده از روابط جریان های سمت اولیه و ثانویه سایر انواع اتصالات ترانسفورماتور که در پست تغذیه سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی استفاده می شود مانند اتصال اسکات و اتصال Le-Blanc، جریان های جبران ساز مناسب را می توان محاسبه کرد.

با توجه به تعریف عدم تعادل که با نسبت توالی منفی به توالی مثبت سنجیده می شود بر ای جبران عدم تعادل کافی است که مولفه توالی منفی حذف گردد. در اینجا برای جبران مولفه توالی منفی با استفاده از تبدیل پارک مولفه منفی جریان بار و جریان مطلوب محاسبه شده، با هم مقایسه شده و جریان جبران ساز از نتیجه این مقایسه محاسبه شده است. شکل ۳-۱۶ الگوریتم جبران ساز را نشان می دهد.

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



شکل ۳-۱۶- الگوریتم پیشنهادی برای جبران همزمان عدم تعادل بار و هارمونیک ها

۳-۳-۵-۲- الگوریتم جبران هارمونیک های جریان

الگوریتم پیشنهادی برای جبران جریان های هارمونیک استفاده از جبران جریان هارمونیک انتخابی می باشد. به این ترتیب که با نمونه برداری از جریان سمت ثانویه این جریان از فیلترهای تنظیم شده برای فرکانس هارمونیک مورد نظر عبور داده شده و خروجی فیلتر، جریان با فرکانس هارمونیک مورد نظر می باشد. این فیلترها معمولاً با تابع تبدیل داده شده در رابطه ۳-۳۳ نشان داده می شوند.

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

$$H_n(s) = \frac{2\omega_c}{s^2 + 2\omega_c s + (n\omega_o)^2}$$

رابطه ۳-۳۳

که در آن $\omega_o = 2\pi f$ فرکانس زاویه ای شبکه، n مرتبه هارمونیک مورد نظر و ω_c فرکانس برش فیلتر می باشد.

انتخاب مقدار کوچک ω_c با ایجاد رزونانس در فرکانس هارمونیکی مورد نظر تنها همان فرکانس هارمونیکی را از شکل موج استخراج می کند.

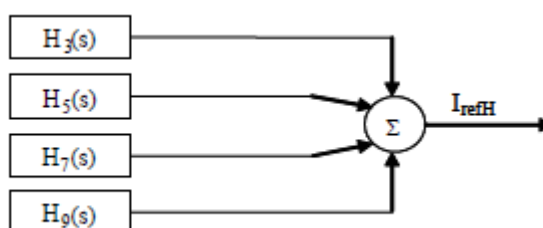
با این، حال اگر این مقدار خیلی کوچک باشد باعث می شود که جبران ساز به تغییرات فرکانسی حساس شود. در عمل این مقدار مابین ۵ تا ۱۰ رادیان بر ثانیه برای ω_c انتخاب می شود. این انتخاب باعث می گردد که علاوه بر فرکانس هارمونیکی مورد نظر فرکانس های میانی نیز به آن افزوده گردد و خروجی فیلتر تنها هارمونیک مورد نظر نباشد.

در الگوریتم پیشنهادی برای رفع مشکل حساسیت جبران ساز نسبت به تغییرات فرکانس از PLL برای سنجش فرکانس شبکه استفاده شده بدین ترتیب با در دست بودن فرکانس شبکه، حساسیت فیلتر به تغییرات فرکانس شبکه از بین رفته و می توان مقادیر کوچکتر را برای ω_c انتخاب کرد تا تنها فرکانس های هارمونیکی از کل جریان شبکه جدا گردد. در این جا از فیلتر رزونانس در فرکانس هارمونیک مورد نظر استفاده شده است. جریان های هارمونیکی که توسط این فیلترها از شکل موج

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

جدا شده اند با هم جمع شده و جریان مرجع جبران هارمونیک جریان را به دست می دهد.

شکل ۳-۱۷ نحوه محاسبه جریان هارمونیکی مرجع I_{refH} با استفاده از فیلترهای تنظیمی برای هارمونیک های مراتب سوم، پنجم، هفتم و نهم را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۷- نحوه محاسبه جریان هارمونیک جریان بار

جریان مرجع جبران ساز، بر اساس جریان محاسبه شده برای جبران عدم تعادل بار، جریان محاسبه شده برای جبران هارمونیکی شبکه و همچنین جریان مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن جبراً نساز تشکیل می یابد.

این جریان به الگوریتم تولید سیگنال سوئیچینگ که در این مبحث از الگوریتم PWM با فرکانس ثابت مرسوم تشکیل شده است داده شده و الگوی سوئیچینگ لازم برای جبران سازی هارمونیک های انتخابی و عدم تعادل بار ایجاد می گردد.

در این مقاله برای رگولاسیون ولتاژ خازن سمت DC، کنترلر مناسب PI برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن محاسبه شده و جریان لازم برای رگولاسیون ولتاژ خازن، با جریان مرجع جبران سازی هارمونیک و عدم تعادل بار جمع شده و به بخش تولید سیگنال سوئیچینگ می رود. شکل ۳-۱۶ الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد.

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

برای افزودن جریان لازم برای رگولاسیون ولتاژ خازن جبران ساز معادلات لازم بین جریان کنترلر و ولتاژ خازن به صورت زیر حاصل می گردد. در این معادلات فرض می شود که سوئیچ ها تلفاتی ندارند و توان ورودی از سمت AC برابر توان سمت DC است. پس داریم:

رابطه ۳-۳۴:

$$P_{ac} + P_{dc} = 0$$

با نوشتن KVL در گره بالای خازن و مقاومت مقدار جریان i_{dc} بر حسب ولتاژ $V_{dc}(t)$ به دست می آید.

رابطه ۳-۳۵:

$$P_{dc} = -v_{dc}(t) \left(C \frac{dv_{dc}(t)}{dt} + \frac{1}{R} v_{dc}(t) \right)$$

رابطه توان P_{ac} را با استفاده از جریان همفاز با ولتاژ (سینوسی همفاز با ولتاژ حاصل از PLL) به صورت زیر می توان نوشت.

رابطه ۳-۳۶:

$$P_{ac} = v_{ph} i_d$$

که در آن v_{ph} ولتاژ فاز و i_d جریان کنترل می باشد. با جایگذاری روابط (۸) و (۹) در رابطه (۷) می توان ولتاژ خازن را بر حسب جریان کنترل i_d به دست آورد.

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

رابطه ۳-۳۷:

$$i_d = -\frac{1}{v_{ph}} \left(C v_{dc}(t) \frac{dv_{dc}(t)}{dt} + \frac{1}{R} v_{dc}^2(t) \right)$$

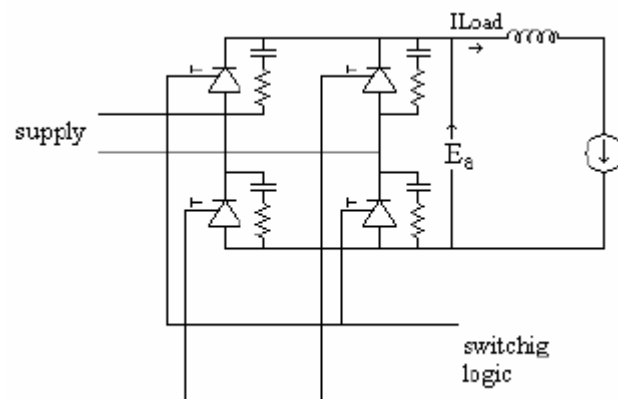
$$v_{dc} = \sqrt{i_d v_{ph} R + K e^{-2t/\tau}}$$

که در آن $\tau = RC$ ثابت زمانی مدار می باشد و i_d سیگنال کنترل مدار می باشد و مقدار ضریب K از شرایط اولیه مدار به دست می آید.

۳-۳-۵-۳- مشخصه شبکه تغذیه حمل و نقل ریلی الکتریکی شبیه سازی شده

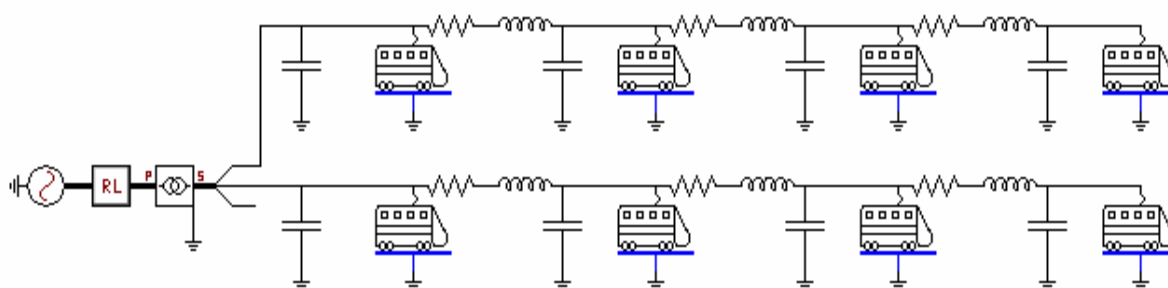
برای شبیه سازی سیستم حمل و نقل تکفاز AC، قطارها با پل تایریستوری تمام موج شبیه سازی شده اند. شکل ۳-۱۸ ساختار شبیه سازی شده یک قطار را نشان می دهد.

بار کانورتر، پیک جریان مولفه اول ۱۰۰ آمپر در سمت تغذیه را ایجاد می کند. با این مقدار جریان هر قطار شبیه سازی شده توانی در حدود ۲/۵ مگا ولت آمپر خواهد داشت.



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

شکل ۳-۱۸- شماتیک قطار شبیه سازی شده



شکل ۳-۱۹- شماتیک شبکه شبیه سازی شده در نرم افزار ATP/EMTP

شبکه تکفاز تغذیه به طول ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده و هر ۱۰ کیلومتر خط با

معادل π خط مدل شده است. امپدانس طولی خط برابر Ω/km $(.432j + .0169)$

در ۵۰ هرتز و خازن موازی برابر $\mu\text{F}/\text{km}$ $.011$ می باشد.

جدول ۳-۴- مشخصات پست تغذیه سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی

پارامتر	مقدار پارامتر
نسبت تبدیل ترانسفورماتور	۶۳/۲۵ kV (per phase)
امپدانس ترانسفورماتور	٪۱۰
قدرت نامی ترانسفورماتور	۳۰ MVA
قدرت اتصال کوتاه شبکه ۶۳ kV	۲۵ kA

در شبکه مدل شده یک قطار در ابتدای خط و در هر ۱۰ کیلومتر دیگر یک قطار در

نظر گرفته شده است تا اثر بار توزیع شده در طول خط در ایجاد هارمونیک ها نیز

دیده شود. مشخصات پست تغذیه سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی در جدول

۳-۴ آمده است.

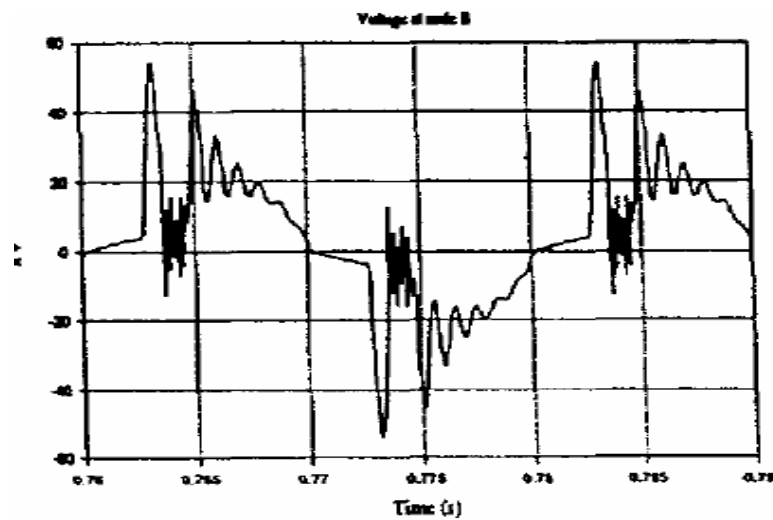
برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ترانسفورماتور تغذیه با اتصال Dyn در نظر گرفته شده است. در سمت yn ترانسفورماتور، فقط از دو فاز برای تغذیه دو فیدر سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی استفاده شده و فاز سوم (در شبیه سازی فاز C) بدون بار در پست رها شده است. شکل ۳-۱۹ شماتیک شبیه سازی شده را نشان می دهد.

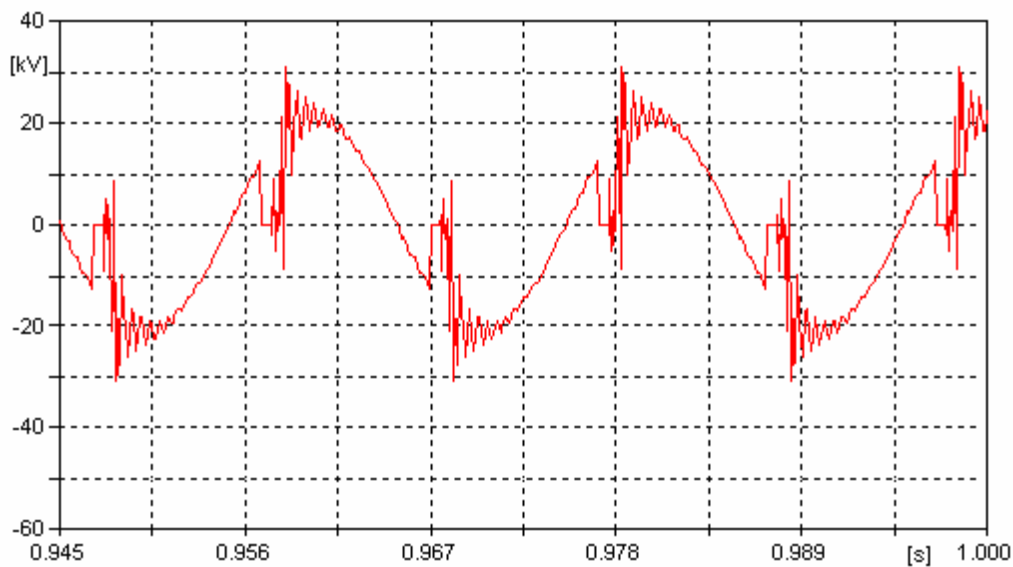
مشخصات خط توزیع برای هر دو فاز یکسان در نظر گرفته شده است و همچنین از برخی بارهای کوچک مربوط به شبکه حمل و نقل که توسط پست تغذیه سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی تغذیه می شوند صرف نظر شده است.

در جدول ۳-۵، IL جریان بار چهار قطار در ابتدای خط و IDL جریان چهار قطار توزیع شده در طول خط تغذیه می باشد. برای بار پخش شده در طول خط این مساله شایان ذکر است که قطارها هرچه به انتهای خط نزدیک می شوند با زاویه آتش کوچکتري کار خواهند کرد تا اینکه قطارها در یک وضعیت عملکردی باهم قرار بگیرند و جریان با اندازه مولفه اصلی یکسان از شبکه بکشند. این طرز عملکرد قطارها و همچنین مدل شدن خازن خط باعث می گردد که جریان به حالت سینوسی نزدیک تر گردد. این مساله را شبیه سازی های انجام شده نیز نشان می دهد.

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

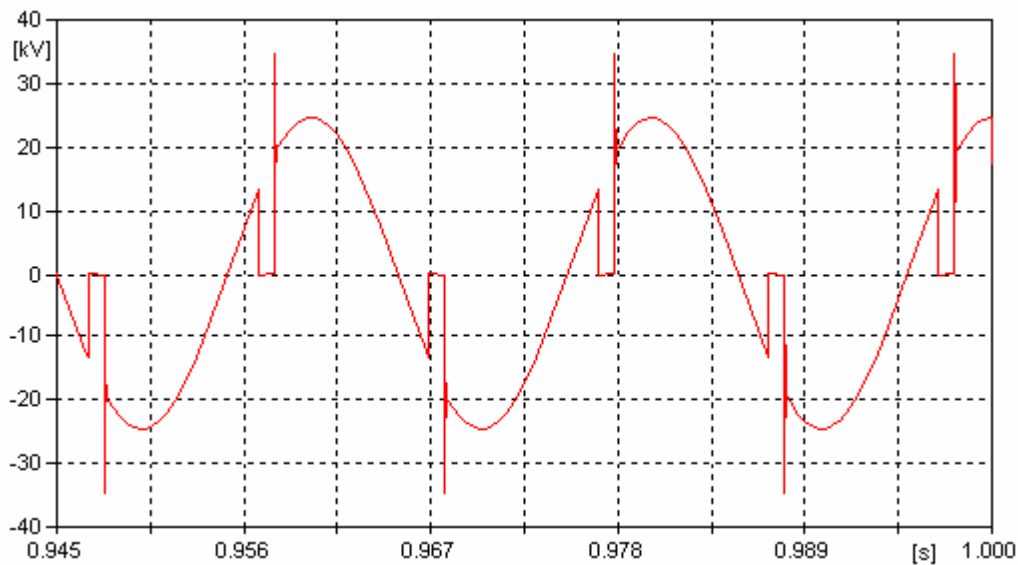


شکل ۳-۲۰- شکل موج اندازه گیری شده در ته خط تغذیه



شکل ۳-۲۱- شکل موج ولتاژ انتهای خط منتهی از شبیه سازی

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



شکل ۳-۲۲- شکل موج ولتاژ با استفاده از مدل بار نقطه های در ابتدای خط



جدول ۳-۵- مقایسه بین بار نقطه های و بار پراکنده

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

مرتبه هارمونیکی	I_L	I_{DL}
مولفه اصلی	$70.5/94 \angle 46$	$70.3/32 \angle 38$
۳	$20.3/82 \angle 145$	$118/24 \angle 129$
۵	$115/0.8 \angle -121$	$61/87 \angle -151$
۷	$74/79 \angle -26$	$35/89 \angle -73$
۹	$50/96 \angle 68$	$20/67 \angle 3$
۱۱	$34/93 \angle 163$	$11/18 \angle 72$
۱۳	$23/41 \angle -103$	$6/23 \angle 125$
۱۵	$14/86 \angle -10$	$5/0.3 \angle 171$

مقایسه بین این دو مدل سازی نشان می دهد که مدل استفاده شده در مقاله نتایج

مشابهی با اندازه گیری های انجام شده از شبکه واقعی به دست می دهد.

برای شبیه سازی قطارها در طول خط با توجه به هارمونیک های ولتاژ که باعث

اعوجاج ولتاژ خط می گردد برای جلوگیری از ایجاد اغتشاش در عملکرد قطارها در

ماژول کنترل زاویه آتش قطارها از PLL برای کنترل عملکرد قطارها و تشخیص

زمان دقیق آتش شدن تایریستورها استفاده شده است.

۳-۳-۴- پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم جبران سازی پیشنهادی از سه بخش تشکیل گردیده است. برای پیاده

سازی الگوریتم در نرم افزار ATP/EMTP روند زیر دنبال گردید هاست.

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

در بخش جبران عدم تعادل بار ولتاژ و جریان سمت بار ترانسفورماتور نمونه برداری شده و مقدار rms آن ها به دست آمده و با استفاده از روابط ۳-۲۹ تا ۳-۳۰ جریان مطلوب برای سمت ثانویه ترانسفورماتور که جریان سه فاز متعادل را در اولیه ایجاد می کند محاسبه گردیده است. حال جریان های ia ، ib ، ia ، ib مثبت را داریم. و همچنین می دانیم که ic و ic مثبت هر دو برابر صفر هستند. با توجه به اینکه هر دو جریان های اندازه گیری شده و محاسبه شده برای سمت ثانویه بار مشابهی را تغذیه می نمایند اختلاف آنها در مولفه توالی منفی آنها می باشد. لذا، برای جبران عدم تعادل بار کافی است که جبران ساز اختلاف جریان توالی منفی دو مجموعه جریان را به شبکه تزریق نماید. لذا با استفاده از روش تبدیل پارک برای هر دو مجموعه جریان های ia ، ib و ic و همچنین ia و ib مثبت و ic مثبت مولفه توالی منفی آنها و مقدار اختلاف آنها استخراج می گردد. برای محاسبه توالی منفی از تبدیل پارک که جهت چرخش آن مخالف جهت توالی مثبت است استفاده می گردد و در تبدیل ωt به $-\omega t$ تبدیل می گردد. حاصل تبدیل پارک به این صورت دارای مقدار dc و فرکانس های ۱۰۰ هرتز و بالاتر می باشد. مقدار dc خروجی با استفاده از فیلتر پایین گذر بدست می آید. با استفاده از PLL فاز و فرکانس زاویه ای ولتاژ شبکه استخراج گردیده و به کمک تبدیل فضای dq به فضای $\alpha\beta$ که در شکل ۳-۱۶ داده شده است جریان های جبران ساز محاسبه می گردد. به این ترتیب از پیچیدگی محاسبات با حضور جریان های توالی مثبت در جبران سازی جلوگیری شده و تنها عدم تعادل بار

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

جبران می گردد. همچنین به دلیل استفاده از PLL تغییرات فرکانس در جبران سازی عدم تعادل تاثیرگذار نخواهد بود.

در بخش جبران هارمونیک های جریان از فیلترهای رزونانس دیجیتال برای جداکردن مولفه های هارمونیکی سوم، پنجم، هفتم و نهم استفاده شده است. فیلترهای دیجیتال استفاده شده با استفاده از PLL که فرکانس شبکه را در هر لحظه سنجش می کند به صورت اتوماتیک برای فرکانس هارمونیک مورد نظر تنظیم می گردند. استفاده از این روش باعث کاهش اندازه جبران ساز هارمونیکی و همچنین عدم وابستگی به تغییرات فرکانس شبکه می گردد.

در بخش رگولاسیون ولتاژ خازن سمت dc فیلتر اکتیو، ولتاژ خازن اندازه گیری شده و با استفاده از فیلتر پایین گذر بخش dc ولتاژ خازن به دست می آید این ولتاژ با مقدار مرجع ولتاژ خازن مقایسه شده و خروجی مقایسه گر که اختلاف بین دو مقدار اندازه گیری شده و مقدار مرجع می باشد به سینوسی با فاز و فرکانس شبکه تغذیه که با استفاده از PLL حاصل می گردد ضرب شده و به جریان مرجع جبران سازی اضافه می گردد.

همانگونه که بیان گردید در روش جبران سازی هایبرید فرکانس های مراتب پایین و با دامنه بزرگتر با استفاده از بخش اکتیو جبران می گردند و سایر هارمونیک با استفاده از فیلتر RLC بالاگذر مناسب جبران می گردند. تا حجم و هزینه جبران

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

ساز اکتیو کاهش یابد . در این مقاله فیلتر RLC بالاگذر برای فرکانس هارمونیک مرتبه یازدهم به بالاتر تنظیم شده است.

برای عمل جبران سازی به صورت مطلوب با استفاده از فیلتر اکتیو به صورت تئوریک جبران ساز باید بتواند با فرکانس ۱۰ برابر بزرگتر از بزرگترین فرکانس هارمونیکی مورد نظر برای جبران سازی که در این مقاله هارمونیک نهم با فرکانس ۴۵۰ Hz می باشد سوئیچ زنی گردد و همچنین برای سنکرون شدن سه فاز در جبران سازی فرکانس سوئیچینگ باید مضرب فردی از ۳ نیز باشد . با در نظر گرفتن این ملاحظات جبران ساز نیاز به سوئیچ هایی دارد که بتوانند با فرکانس ۴۹۵۰ Hz سوئیچ زنی گردند.

در حال حاضر سوئیچ هایی با این قابلیت در دسترس نمی باشند و سوئیچ های موجود در فرکانس کمتر از ۱ kHz کاری کنند . با در نظر گرفتن این محدودیت عملی در این مقاله سوئیچ ها با فرکانس ۹۵۰ Hz مورد استفاده قرار گرفته اند تا از هر لحاظ شبیه سازی انجام شده به واقعیت نزدیک باشد.

۳-۳-۵- نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی انجام شده توسط نرم افزار ATP/EMTP در سه بخش ارائه می گردد . در بخش اول وضعیت هارمونیکی جریان های سه فاز سمت اولیه و میزان عدم تعادل بار در سمت اولیه قبل از جبران سازی ارائه شده است؛ در بخش دوم جریان های سمت اولیه ترانسفورما تور تغذیه پس از جبران سازی با الگوریتم پیشنهادی

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

داده شده است . و در بخش سوم، برای نشان دادن قابلیت الگوریتم جبران سازی پیشنهاد شده، شبکه تغذیه غیرمستحکم در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از جبران سازی در این وضعیت ارائه می گردد.

۳-۳-۵-۶- قبل از جبراً نسازی

سیستم های حمل و نقل ریلی از کانورترهای پل تایریستوری استفاده می کنند که جریان های هارمونیک با مراتب پایین را به شبکه تزریق می کنند. در شبیه سازی انجام شده از پارامترهای π خط و بار پراکنده در سیستم استفاده شده است تا شرایطی شبیه شرایط واقعی مورد بررسی قرار گیرد . شکل ۳-۲۰ جریان و طیف هارمونیک جریان سیستم شبیه سازی شده را نشان می دهد. که در آن اعوجاج کلی جریان (THD) با استفاده از رابطه ۳-۳۸ محاسبه شده است.

رابطه ۳-۳۸:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} U_h^2}}{U_1} \times 100$$

که در آن h مرتبه هارمونیک، U_1 مقدار موثر مولفه اصلی و U_h مقدار موثر هارمونیک h می باشد.

عدم تعادل بار نیز بر اساس درصد نسبت مولفه توالی منفی به توالی مثبت سنجیده می شود که در رابطه زیر داده شده است.

رابطه ۳-۳۹:

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

$$\text{Unbalance} = \frac{U_2}{U_1} \times 100$$

از شکل ۳-۲۴ میزان عدم تعادل بار که بر اساس درصد توالی منفی به توالی مثبت سنجیده می شود برابر ۳/۴۹٪ می باشد.

۳-۳-۵-۷- پس از استفاده از فیلتر اکتیو با الگوریتم جبراً نسازی پیشنهادی

با استفاده از الگوریتم جبران ساز پیشنهادی، جریان های مرجع هارمونیک و عدم تعادل محاسبه شده و جریان جبران سازی لازم مشخص می شود. سپس با استفاده از الگوی سوئیچینگ PWM با فرکانس ثابت جبران سازی انجام می پذیرد. شکل ۳-۲۵ جریان های سه فاز اولیه را پس از جبران سازی که با الگوریتم پیشنهادی انجام شده است را نشان می دهد.

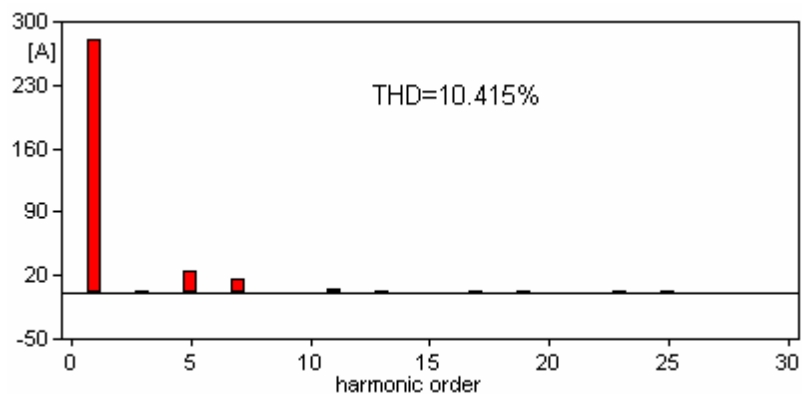
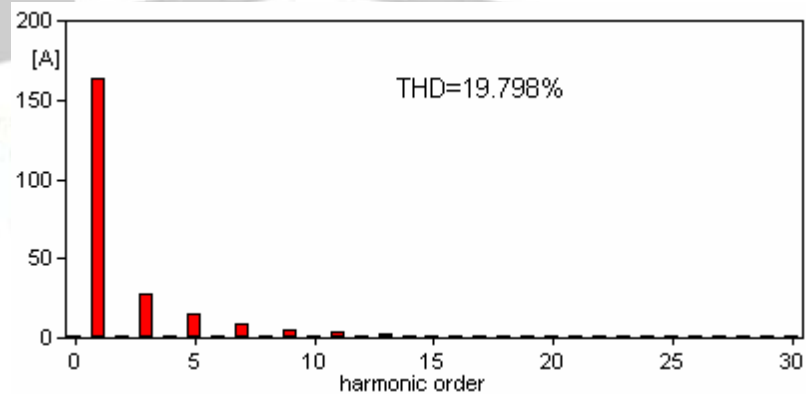
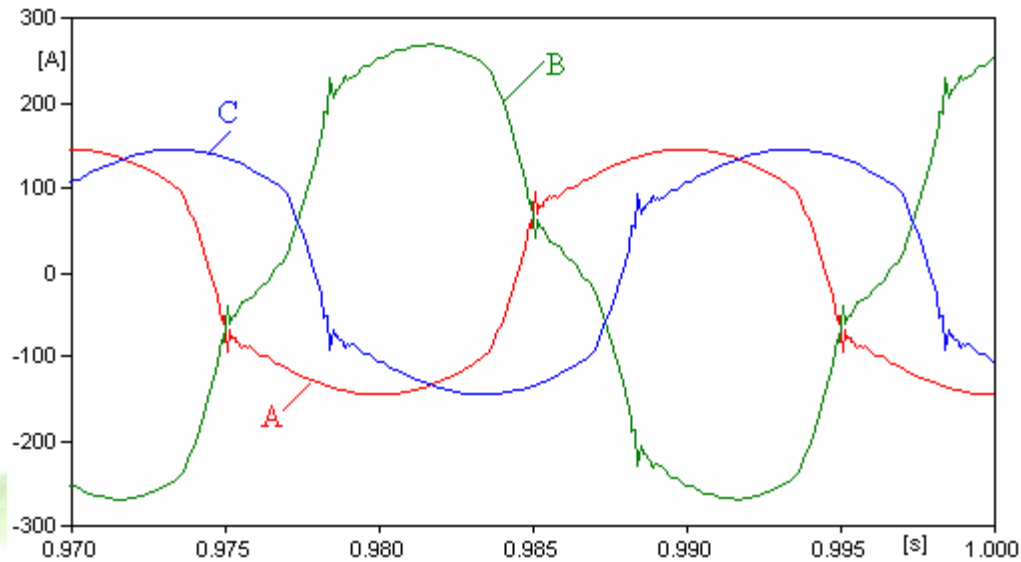
همانگونه که در شکل ۳-۲۵ دیده می شود جریان های سه فاز کاملاً متعادل شده و میزان هارمونیک های جریان که در شکل ۳-۲۶ نشان داده شده اند تا حد زیادی کاهش یافته و در حدود مجاز استاندارد داده شده توسط IEEE ۵۱۹ رسیده است. در شکل ۳-۲۶ فرض شده است که در انتهای فیدر فازهای A و B به صورت همزمان یک قطار اضافه شده است. شکل ۳-۲۶ دینامیک تغییرات را با جبران ساز پیشنهاد شده را نشان می دهد.

شکل های ۳-۲۶ و ۳-۲۷ نشان می دهند که الگوریتم کنترل به خوبی توانسته هارمونیک های جریان و عدم تعادل تحمیل شده را جبران نماید. جریان های سه فاز اولیه سه سیکل پس از تغییرات بار در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است. شکل

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

۲۸-۳ نشان می دهد که هارمونیک های جریان جبران شده و عدم تعادل بار کمتر

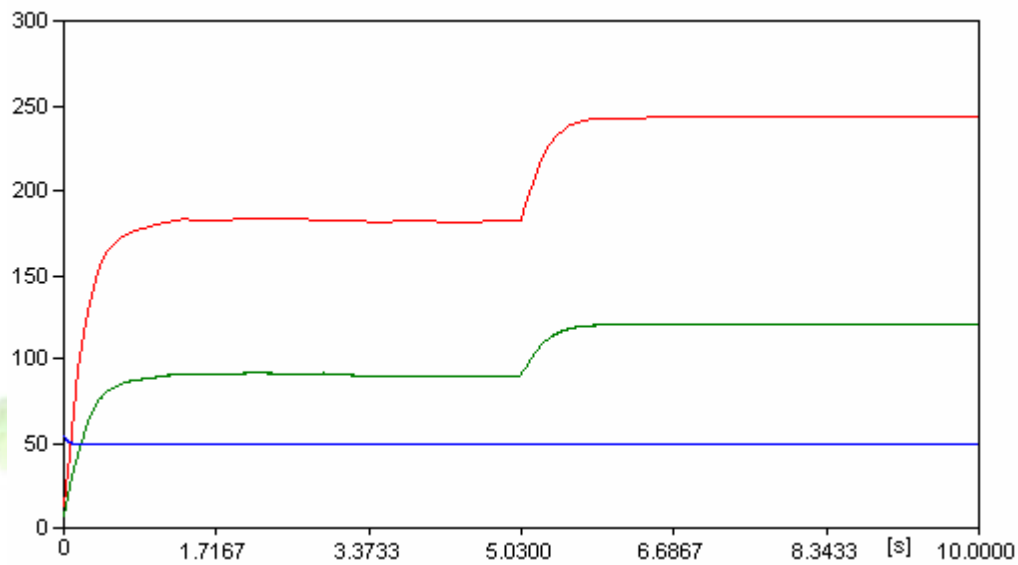
از زمان شروع تغییرات شده است. میزان عدم تعادل در این وضعیت ۲/۵٪ می باشد.



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

شکل ۳-۲۳- جریان سه فاز اولیه الف-جریان سه فاز ب-طیف هارمونیکی جریان

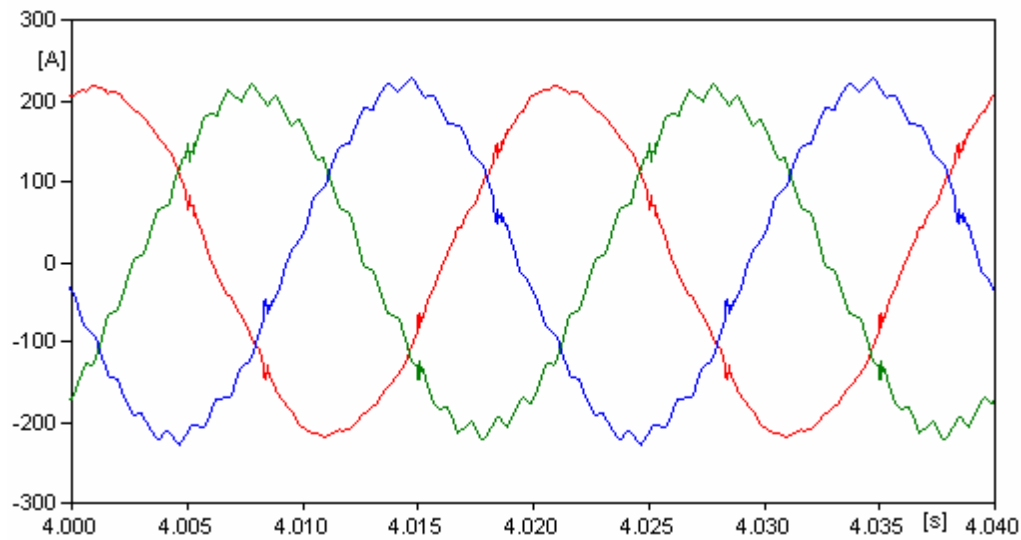
فاز A و C- طیف هارمونیکی جریان فاز B



شکل ۳-۲۴- عدم تعادل بار با نسبت مولفه توالی منفی به مولفه توالی مثبت و اثر

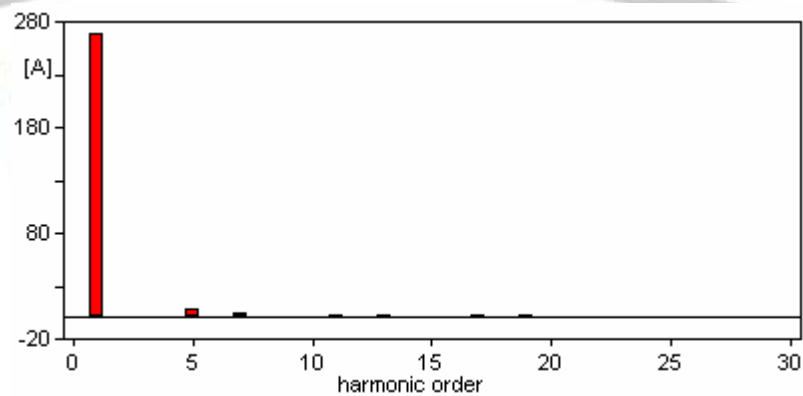
تغییرات بار بر آن

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

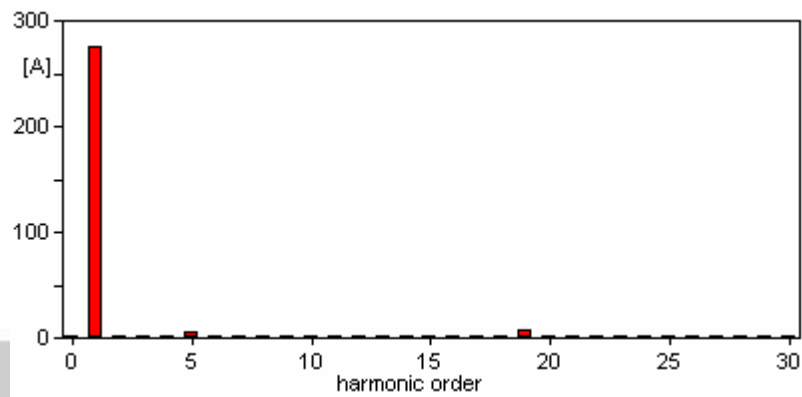
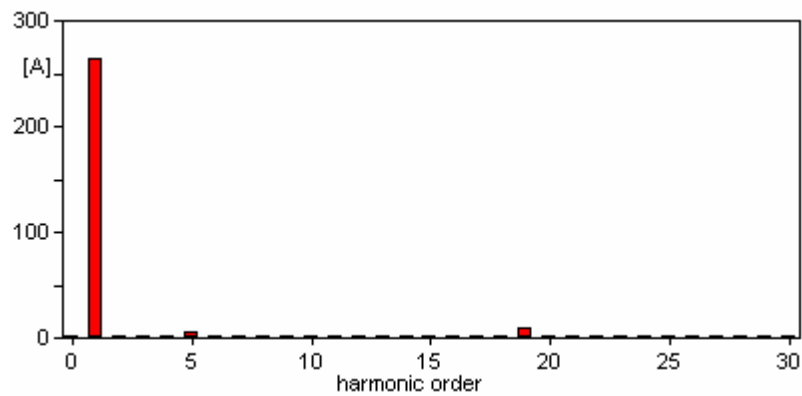


شکل ۳-۲۵- جریان های سه فاز اولیه ترانسفورماتور و هارمونیکهای هر فاز پس

از جبرانسازی با الگوریتم پیشنهادی



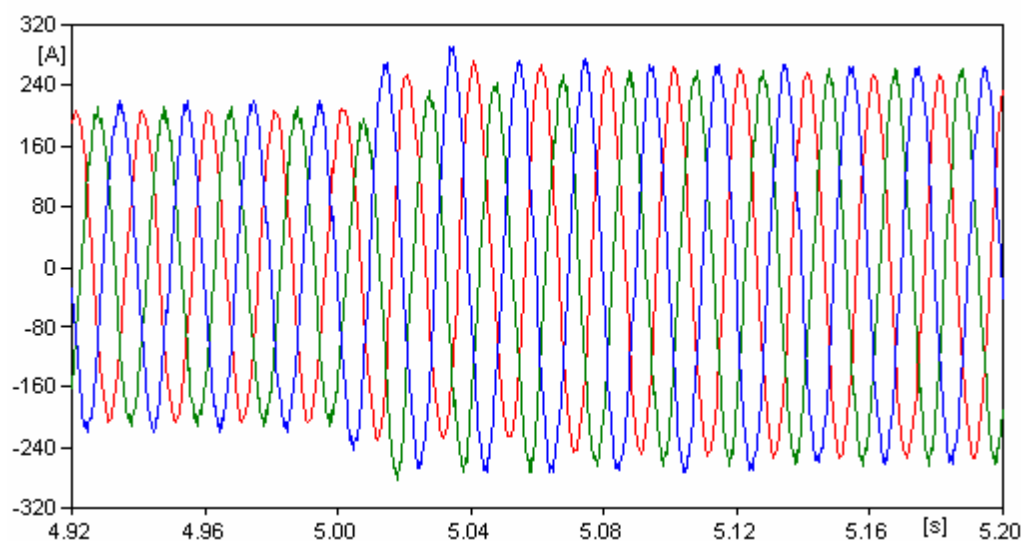
برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۲۶- طیف هارمونیکی جریان های اولیه ترانسفورماتور پس از جبران سازی

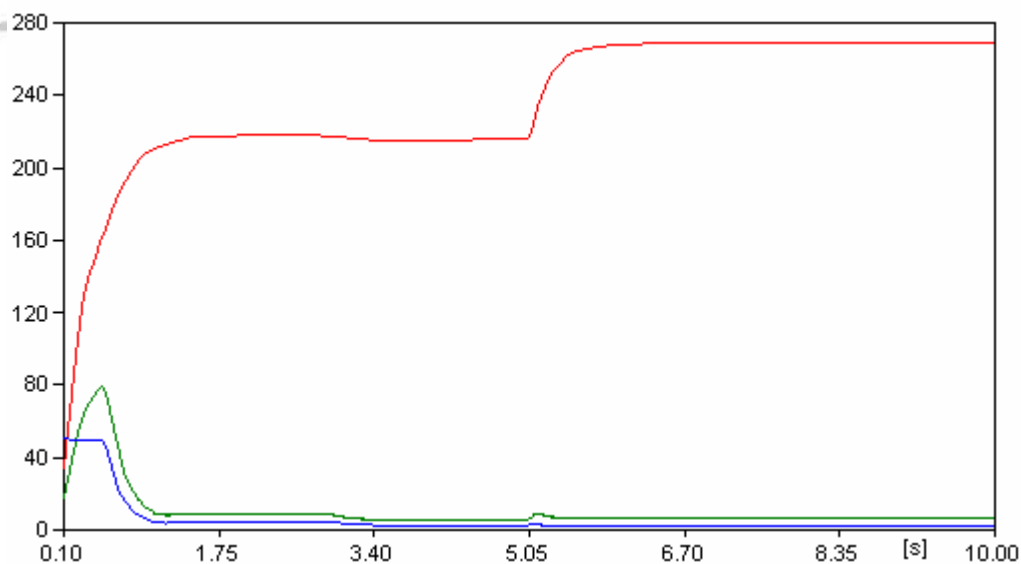
به ترتیب فاز A، فاز B و فاز C

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



شکل ۳-۲۷- تغییرات جریان های اولیه ترانسفورماتور با اضافه شدن قطار به

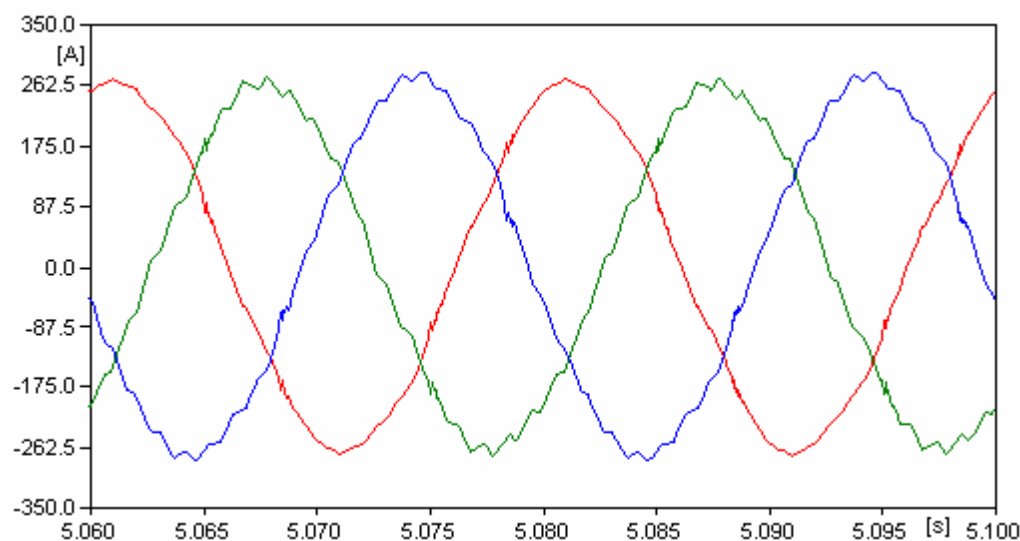
صورت همزمان به انتهای دو فاز تغذیه در ۵sec با جبران ساز پیشنهادی



شکل ۳-۲۸- جبران عدم تعادل بار از شروع جبران سازی و پس از تغییرات بار

ایجاد شده در شبیه سازی

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



شکل ۳-۲۹- شکل موج جریا نه‌ای سه فاز اولیه مدتی پس از تغییرات دفعی بار

بدلیل اضافه شدن دو قطار به شبکه تغذیه

۳-۳-۵-۸- استفاده از فیلتر اکتیو در شبکه غیرمستحکم با الگوریتم جبراً نسازی

پیشنهادی

در دو بخش قبل الگوریتم جبران سازی در شبکه با قدرت اتصال کوتاه بالا مورد بررسی قرار گرفت که در این نوع سیستم جریان بار بر روی ولتاژ شبکه تاثیرگذار نیست. در این بخش از مقاله شرایطی مورد بررسی قرار می‌گیرد که قدرت اتصال کوتاه شبکه ۱۰ برابر کوچکتر از شبکه مدل شده باشد. در این شرایط اعوجاج ایجاد شده در شکل موج جریان بار، بر شکل موج ولتاژ شبکه نیز تاثیرگذار خواهد بود شکل ۳-۳۰ تاثیر عدم تعادل ولتاژ شبکه در این شرایط بدون انجام جبران سازی لازم را نشان می‌دهد. در این شرایط عدم تعادل ولتاژ به مقدار ۳٪ می‌رسد که عدم

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

تعادل بسیار بزرگی است که می تواند باعث ایجاد اختلال در کارکرد بقیه بارهای شبکه گردد.

شکل ۳-۳۱ جریان های سه فاز متعادل پس از جبران سازی با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می دهد.

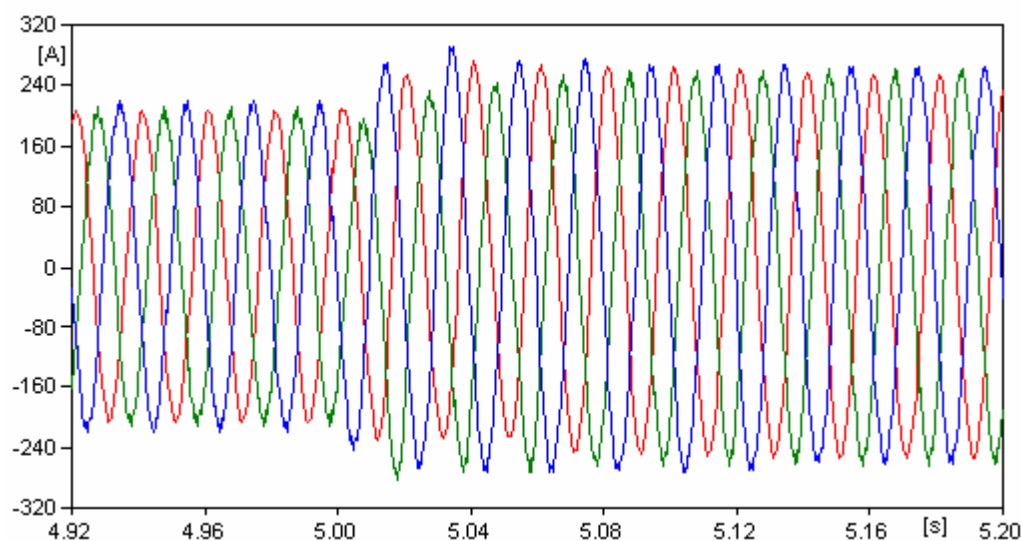
شکل ۳-۳۲ اثر تغییرات بار بر روی جبران سازی در شبکه غیر مستحکم را نشان می دهد.

همانگونه که نتایج شبیه سازی نشان میدهد الگوریتم جبران سازی در شبکه غیر مستحکم عدم تعادل ولتاژ و جریان و همچنین هارمونیک های جریان را جبران نمود هاست. همانگونه که در شکل ۳-۳۴ نشان داده شده است فاکتور عدم تعادل ولتاژ که با نسبت مولفه توالی منفی به مولفه توالی مثبت ولتاژ سه فاز سنجیده می شود با استفاده از الگوریتم جبران سازی پیشنهادی از حدود ۳٪ به کمتر از ۰.۰۵٪ رسیده است.

شکل ۳-۳۰- عدم تعادل ولتاژ ناشی از عدم تعادل بار در شبکه غیرمستحکم

شکل ۳-۳۱- جریان های سه فاز اولیه ترانسفورماتور و هارمونیک های فازها پس از جبران سازی در شبکه غیر مستحکم

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



شکل ۳-۳۲- تغییرات جریان های اولیه ترانسفورماتور با اضافه شدن قطار به

صورت همزمان به انتهای دو فاز تغذیه در ۵ sec با جبران ساز پیشنهادی در شبکه

غیر مستحکم

شکل ۳-۳۳- جبران عدم تعادل بار از شروع جبران سازی و پس از تغییرات بار

ایجاد شده در شبی هسازی با شبکه غیر مستحکم

شکل ۳-۳۴- جبران عدم تعادل ولتاژ از شروع جبران سازی و پس از تغییرات بار

ایجاد شده در شبی هسازی با شبکه غیر مستحکم

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

۳-۳-۵-۹- نتیجه گیری

سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی تکفاز AC باعث ایجاد هارمونیک های مراتب پایین و عدم تعادل بار در سیستم تغذیه خود می گردند. در این مقاله الگوریتمی برای جبران هارمونیک ها و عدم تعادل بار سیستم های حمل و نقل ریلی الکتریکی ارائه شده است که به صورت همزمان عدم تعادل بار و هارمونیکهای جریان شبکه تغذیه را جبران کرده و شاخص های کیفیت توان را بهبود می بخشد. شبیه سازی ها نشان می دهند که استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای جبران سازی کاملا موثر بوده و جریان های هارمونیک و عدم تعادل بار ایجاد شده توسط بار را حذف می کند. روش جدید ارائه شده در این مقاله در مقایسه با الگوریتم های پیشنهادی قبلی این مزیت را دارد که برای انواع اتصالات ترانسفورماتور قابل طرح می باشد، نیاز به ترانسفورماتور کوپلینگ با اتصال خاص ندارد و از فیلتر اکتیو تکفاز هایبرید برای جبران مستقل دو فاز تغذیه استفاده می کند. بعلاوه استفاده از جبران ساز سمت بار باعث کاهش هزینه جبران سازی نیز می گردد.