بهبودکاهش فلیکر ولتاژ با بهره‌گیری از کنترل فازی درجبران‌کننده سنکرون استاتیکی توزیع (DSTATCOM)

غضنفر شاهقلیان[۱]، ابراهیم حق‌جو[۲]، سعید اباذری[۳]
۱- استادیار،گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، Shahgholian@iaun.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، ebrahimhaghjou@yahoo.com
۳- استادیار، گروه برق، دانشگاه شهرکرد، SaeedAbazari@yahoo.com

چکیده

این مقاله به مطالعه یک جبران‌کننده سنکرون استاتیکی با کنترل فازی می‌پردازد، که می‌تواند جهت کاهش فلیکر ولتاژ در یک سیستم توزیع بکار گرفته شود. فلیکر ولتاژ به‌وسیله‌ی یک بار بزرگ دارای جذب پیوسته جریان‌های متغیر مانند کوره قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. یک DSTATCOM شامل یک اینورتر PWM منبع ولتاژی و سیستم کنترل آن است. استراتژی کنترل DSTATCOM نقش مهمی درکاهش فلیکر ولتاژ ایفا می‌کند. در اینجا کنترلر DSTATCOM با دو نوع تنظیم کننده خطی تناسبی - انتگرالی (PI) و غیرخطی منطق فازی طراحی شده است. شبیه‌سازی یک DSTATCOM با توان راکتیو ±3MVar روی یک شبکه توزیع 25KV در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK انجام شده است. در انتهای مقاله کنترلرهای فازی به‌وسیله مقایسه عملکردشان با کنترلرهای PI ارزیابی شده‌اند. مشاهده می‌شود که کنترلرهای فازی درکاهش فلیکر ولتاژ مؤثرتر هستند.

واژه‌های کلیدی

جبران‌کننده سنکرون استاتیکی توزیع، فلیکر ولتاژ، کنترلر فازی، کنترلر PI.

۱– مقدمه

در بازار خصوصی برق استاندارد کیفیت توان به‌عنوان یک شاخص برای رقابت شرکت های برق پدیدار شده است [۱]. به‌طور کلی هر مشکلی که در جریان ولتاژ و یا فرکانس ظاهر شده و باعث ایجاد خطا و یا عملکرد ناصحیح دستگاه‌ها شود، به‌عنوان یک مشکل کیفیت توان مطرح است. از جمله این مشکلات می‌توان به پدیده چشمک زدن ولتاژ یا همان فلیکر ولتاژ اشاره کرد [۲]. این پدیده از مهمترین مسائل شرکت‌های برق در مواجهه با صنایع بزرگ می‌باشد. با توجه به استفاده از تجهیزات حساس در طرح‌های صنعتی مدرن نظیر فرآیندهای کنترل، PLC[۱]، درایوهای تنظیم سرعت،گیرنده‌های مخابراتی و روبات‌ها، دیگر پدیده فلیکر ولتاژ در سیستم‌های قدرت قابل تحمل نمی‌باشد.

از سال‌های پیش روش‌های مختلفی برای کاهش فلیکر ولتاژ بکار گرفته شده‌اند. روش‌های مرسوم در این زمینه استفاده از کندانسورهای سنکرون، راکتورهای قابل اشباع، راکتورهای کنترل شده با تریستور (T.C.R)[۲]، خازن‌های سوئیچ شونده تریستوری (T.S.C)[۳] می‌باشند. در سال‌های اخیر با پیشرفت صنایع نیمه هادی، استفاده از جبران‌کننده‌های برپایه مبدل‌های ولتاژ و جریان مورد توجه کارشناسان برق قرار گرفته است. این مبدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم‌های توزیع موسوم به ادوات Custom Power هستد، که جهت بهبود کیفیت توان بکار برده می‌شوند. این تجهیزات به‌صورت موازی، سری یا ترکیبی از آنها به خطوط تغذیه متصل می‌شوند [۳]، [۴]. یکی از این تجهیزات

Archive of SID

www.SID.ir

جبران‌کننده سنکرون استاتیکی توزیع (DSTATCOM)[۴] است، که به‌صورت موازی به شبکه‌ی توزیع متصل می‌شود و به‌عنوان یک منبع ولتاژ سنکرون عمل نموده و می‌تواند توان راکتیو معینی را بدون توجه به سطح ولتاژ AC، سیستم توزیع جبران نماید [۵]. پاسخ سریع، عدم تولید هارمونیک، تنظیم ولتاژ AC سیستم، کاهش نوسانات توان اکتیو و راکتیو یا جریان‌های هارمونیکی کشیده شده توسط بار وکاهش فلیکر ولتاژ از مشخصه‌های بارز آن است [۶]، [۷].

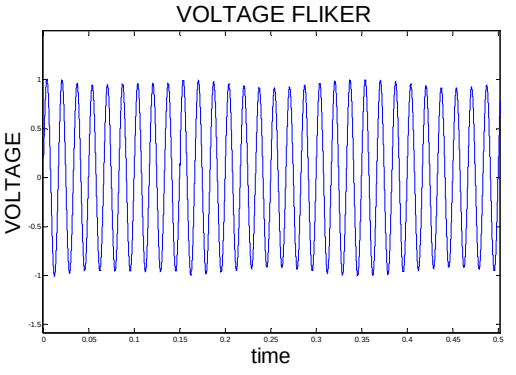
در این مقاله با استفاده از DSTATCOM، جبران‌سازی سریع توان اکتیو و راکتیو و جریان‌های هارمونیکی بار، تنظیم ولتاژ باس بار و کاهش فلیکر ولتاژ انجام شده است. از دو روش کنترلی، خطی PI[۵] و غیرخطی منطق فازی در تنظیم‌کننده‌های موجود در ساختارکنترلر اینورتر SPWM[۶] متعلق به DSTATCOM استفاده شده است، سپس نتایج حاصل از این دو نوع شیوه کنترلی با هم مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده مقاوم‌تر بودن کنترل‌کننده‌های فازی نسبت به کنترل‌کننده‌های PI است.

ساختار نوشتاری این مقاله به این صورت است که در بخش ۲، پدیده فلیکر ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳، ساختار و چگونگی عملکرد DSTATCOM در مواجهه با فلیکر ولتاژ مورد بحث قرار گرفته و سپس ساختار کنترلر DSTATCOM در بخش ۴ توضیح داده می‌شود. در بخش ۵ طراحی تنظیم کننده‌های فازی انجام شده است. در نهایت بررسی سیستم توزیع مورد مطالعه و نتیجه‌گیری در بخش‌های ۶ و ۷ آورده شده‌اند.

۲– فلیکر ولتاژ

تغییرات سریع و پیوسته جریان‌های تغذیه برخی بارهای بزرگ مانند کوره‌های الکتریکی، دستگاه‌های نورد و دستگاه‌های حفاری در مواقعی آنقدر زیاد است که منجر به تغییرات متناوب ولتاژ سیستم تغذیه یا همان فلیکر ولتاژ (چشمک زدن ولتاژ) می‌شود [۸]. براساس تعریف ANSI C84,1–1981 فلیکر ولتاژ عبارت است از تغییرات منظم پوش ولتاژ یا یک سری تغییرات تصادفی که دامنه آنها معمولاً از ۰.۹ تا ۱,۱ پریونیت باشد. مثالی از یک شکل موج دارای فلیکر در شکل (۱) نشان داده شده است.

سیگنال فلیکر به‌صورت تغییرات مقدار مؤثر دامنه برحسب درصد مؤلفه اصلی بیان می‌شود. به‌منظور به حداقل رساندن آثار نامطلوب فلیکر ولتاژ بر روی تجهیزات حساس الکتریکی و الکترونیکی باید تغییرات مقدار مؤثر دامنه ولتاژ کمتر از مقدار توافق آستانه آزار نگه داشته شود. در اکثر کشورها آستانه آزار در رابطه با حساسیت چشم انسان تعیین می‌شود. معمولاً تغییرات دامنه به اندازه ۱ درصد دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ در فرکانس ۵ تا ۸ هرتز موجب چشمک زدن لامپ‌ها می‌شود، بنابراین همین سطح تغییرات به‌عنوان آستانه آزار در نظر گرفته می‌شود.

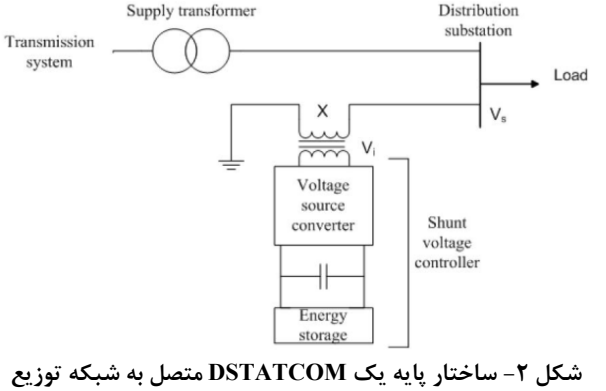


شکل ۱- شکل موج یک فلیکر ولتاژ

۳– ساختار و شرح عملکرد DSTATCOM

تثبیت ولتاژ با استفاده از جبران‌کننده‌ها در باس دارای بار متغیر از راه‌های مؤثر در کاهش فلیکر می‌باشد. از میان جبران‌کننده‌ها فقط جبران‌کننده‌های راکتیو دارای پاسخ سریع می‌توانند به خوبی در مواجهه با فلیکر ولتاژ عمل کنند. جبران‌کننده سنکرون استاتیکی در شبکه‌ی توزیع (DSTATCOM) یکی از ادوات Custom Power است [۹]، که به‌صورت موازی به شبکه‌ی توزیع متصل می‌شود و به‌عنوان یک منبع جریان کنترل‌شونده با پاسخ سریع، می‌تواند در کاهش نوسانات توان اکتیو و راکتیو و جریان هارمونیکی کشیده شده توسط بارهای متغیر و تنظیم ولتاژ مؤثر باشد.

DSTATCOM تنظیم ولتاژ را به کمک جذب یا تولید توان راکتیو انجام می‌دهد. شکل (۲) دیاگرام ساده‌ای از اجزاء اصلی تشکیل دهنده یک DSTATCOM را دریک سیستم قدرت نشان می‌دهد [۶].



شکل ۲- ساختار پایه یک DSTATCOM متصل به شبکه توزیع

Archive of SID

www.SID.ir

اجزاء اصلی DSTATCOM شامل یک اینورتر منبع ولتاژ (VSI)[۷] سه فاز، خازن تأمین کننده ولتاژ DC اینورتر، یک ترانسفورماتور تزویج، فیلتر ac بین ترانس و اینورتر، یک سیستم کنترلی جهت کنترل سوئیچینگ کلیدهای اینورتر و نهایتاً درصورت لزوم یک منبع ذخیره انرژی خارجی به‌منظور جبران‌سازی بهتر توان اکتیو است.

وظیفه DSTATCOM در این مقاله تنظیم ولتاژ باس بار با جذب یا تزریق توان راکتیو و اکتیو متناسب با جریان‌های هارمونیکی بار متغیر است، به گونه‌ای که باعث کاهش پدیده فلیکر ولتاژ در سایر بارهای متصل به باس بار شود. DSTATCOM با تنظیم دینامیکی زاویه فاز بین ولتاژ اینورتر (ولتاژ اولیه ترانس تزویج) و ولتاژ سیستم توزیع (ولتاژ ثانویه ترانس تزویج) و از طریق راکتانس نشتی ترانسفوماتور تزویج به تبادل توان اکتیو و راکتیو با شبکه توزیع می‌پردازد. با صرف نظر از جریان‌های هارمونیکی درون راکتانس نشتی می‌توان روابط ذیل را نوشت:

$$I = \frac{V_i - V_S}{jX} \qquad (۱)$$

$$P = \frac{V_i \cdot V_S}{X} Sin\alpha \qquad (۲)$$

$$Q = \frac{V_i \cdot V_S}{X} Cos\alpha - \frac{{V_S}^2}{X} \qquad (۳)$$

که در آن Vi ولتاژ اینورتر، Vs ولتاژ سیستم توزیع و X راکتانس نشتی ترانسفوماتور تزویج و α اختلاف فاز بین Vi و Vs است. P و Q میزان توان اکتیو و راکتیو مبادله شده بین DSTATCOM و شبکه توزیع هستند.

۴- ساختار کنترلر DSTATCOM

با توجه به نوع اینورتر مورد استفاده در ساختار DSTATCOM، استراتژی‌های متفاوتی در زمینه کنترل آن پیشنهاد می‌شود [۱۰]. در این بخش، در ساختار جبران‌کننده از یک اینورتر منبع ولتاژ با روش سوئیچینگ SPWM که شامل دو پل IGBT[۸] استفاده شده است. هر کدام از پل‌های IGBT یک اینورتر سه سطحی با فرکانس مدولاسیون 1.68KHz=60×28 است. هر یک از این اینورترهای سه سطحی دارای تعداد زیادی کلیدهای IGBT با کنترل گیت است. وظیفه کنترلر DSTATCOM ایجاد فرامین عملکرد گیت برای کلیدهای اینورتر است، به‌گونه‌ای که عملکرد مناسب جبران‌کننده متناسب با تغییرات توان و ولتاژ شبکه توزیع را، تضمین کند.

در این مقاله از تکنیک کنترل مستقیم در ساختار کنترلر DSTATCOMاستفاده شده است. شکل (۳) ساختار کنترلر یک DSTATCOM را نشان می‌دهد [۱۱]. ورودی‌های این کنترلر دو نوع پارامتر هستند:

پارامترهای اندازه‌گیری شده و پارامترهای مرجع از پیش تعیین شده؛ مقادیر از پیش تعیین شده شامل ولتاژ dc مرجع خازن با مقدار ۲,۴ کیلو ولت (Vdcref=2.4kv)، ولتاژ ac مرجع با اندازه یک پریونیت (Vacref=1p.u) و توان راکتیو مرجع به میزان صفر پریونیت (Qref=0p.u) است. مقادیر اندازه‌گیری شده شامل ولتاژها و جریان‌های سه‌فاز (Vabc,Iabc) باس DSTATCOM و ولتاژ dc خازن (Vdc) آن می‌باشند. مطابق شکل (۳) کنترلر DSTATCOM، شامل چندین قسمت است،که عبارتند از:

- یک حلقه قفل فاز(PLL) که برای دو منظور با ولتاژ اولیه ترانس (سمت شبکه توزیع) سنکرون شده است. اولاً باید دستگاه مرجع سنکرون (Coswt,Sinwt) مورد نیاز برای مبدل‌های abc به qd0 (و برعکس) را فراهم کند، ثانیاً باید سیگنال سرعت زاویه‌ای نامیرای (w) مورد نیاز سیستم کنترلی DSTATCOM را تولید کند.

- واحد اندازه‌گیری (Measurment Unit)، متغییرهای ولتاژ و جریان سه فاز را توسط مبدل abc به qd0 به یک چهارچوب مرجع سنکرون که توسط حلقه قفل فاز ایجاد شده، منتقل می‌کند. خروجی‌های این قسمت جریان‌های I_d[۹]، I_q[۱۰] و مقدار مؤثر دامنه ولتاژ (MagV) می‌باشند، که مقدار مؤثر دامنه ولتاژ از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$MagV = \sqrt{({V_d}^2 + {V_q}^2)} \qquad (۴)$$

- یک بلوک جهت تعیین مد عملکرد DSTATCOM در دو مد تنظیم ولتاژ (Voltage Regulation) و مد تنظیم توان راکتیو (Reactive Power Regulation).

- حلقه کنترل بیرونی تنظیم ولتاژ AC[۱۱] (ACVR) که فقط در مد عملکرد تنظیم ولتاژ DSTATCOM فعال است. این حلقه کنترلی شامل یک کنترلر PI است که ورودی آن اختلاف بین مقدار مؤثر دامنه ولتاژ و ولتاژ مرجع ac و خروجی آن Iqref است.

- بلوک کنترلی Iqref (Manul) که فقط در مد عملکرد تنظیم توان راکتیو DSTATCOM فعال است. خروجی آن Iqref است که اندازه‌ی آن از تقسیم توان راکتیو مرجع بر مقدار مؤثر دامنه ولتاژ بدست می‌آید.

- حلقه کنترلی تنظیم‌کننده ولتاژ DC خازن[۱۲] (DCVR) که شامل یک کنترلر PI است که ورودی آن اختلاف بین دامنه ولتاژ dc خازن و ولتاژ dc مرجع و خروجی آن Idref است.

Archive of SID

www.SID.ir

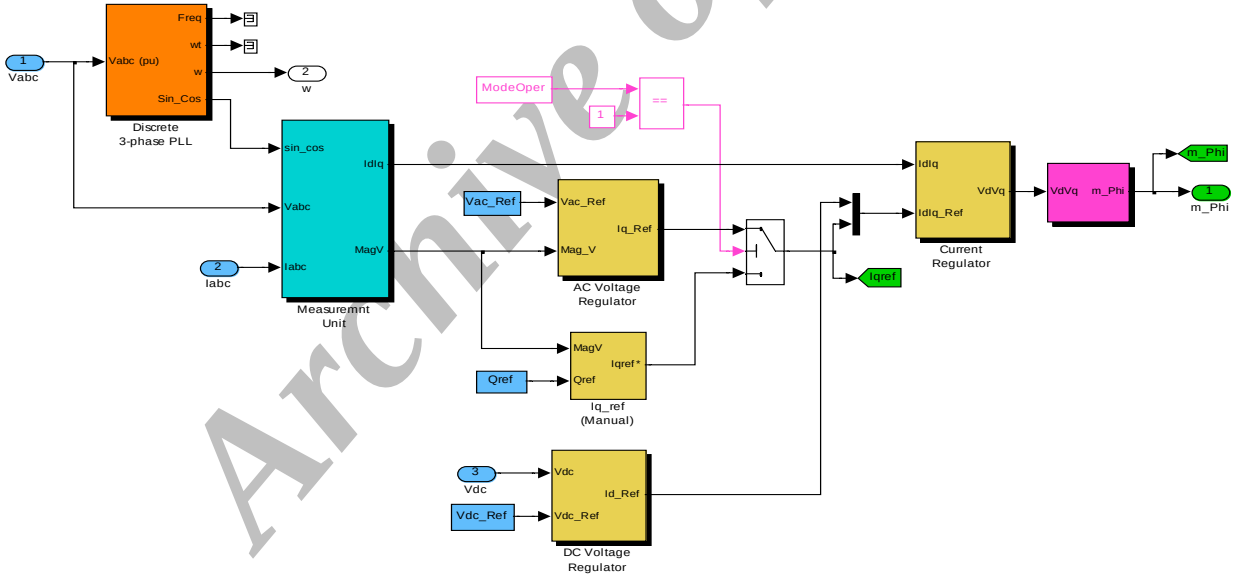
- حلقه کنترل درونی تنظیم جریان‌های Iq (IqR)[۱۳] و Id (IdR)[۱۴] شامل دو کنترلر PI برای تنظیم جریان‌های Iq و Id است. ورودی‌های کنترلر استفاده شده در حلقه کنترلی تنظیم جریان Iq، زوج (Iq و Iqref) است و خروجی آن ولتاژ Vq می‌باشد و به همین ترتیب ورودی‌های کنترلر حلقه کنترلی تنظیم جریان Id، (Id و Idref) و خروجی آن ولتاژ Vd است.

ولتاژهای Vd و Vq به یک بلوک وارد می‌شوند، که ولتاژ را از حالت دکارتی به حالت قطبی شامل شاخص مدولاسیون (m) و فاز (phi) تبدیل می‌کند. در ادامه این حالت قطبی ولتاژ همراه با سیگنال سرعت زاویه‌ای نامیرای ناشی از بلوک حلقه قفل فاز به ولتاژهای Va، Vb و Vc تبدیل می‌شوند، که این ولتاژهای سه فاز باید توسط اینورتر SPWM تولید شوند. درنهایت به کمک یک بلوک PWM Pulse Generator زوایای آتش IGBT های اینورتر SPWM تولید می‌شوند.

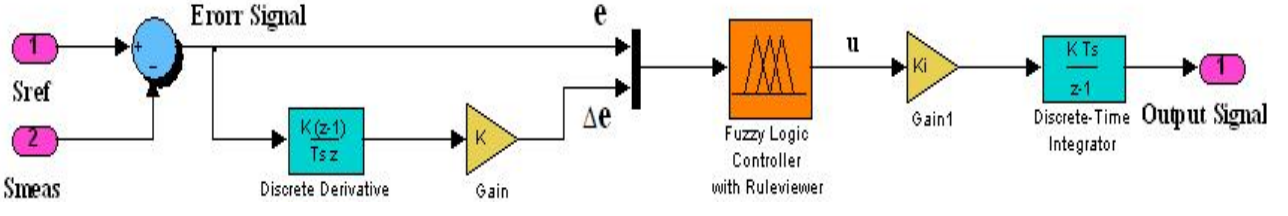
۵- طراحی تنظیم کننده‌های فازی

توپولوژی سیستم توزیع متناسب با تغییرات شبکه، بار و ... متغیر با زمان است. این عدم قطعیت و نامعینی در مدل سیستم باعث عدم کارآیی مطلوب جبران‌کننده‌های دارای سیستم‌های کنترل حاوی کنترل‌کننده‌های خطی می‌گردد، زیرا پارامترهای کنترلرهای خطی به توپولوژی سیستم توزیع وابسته هستند، بنابراین تمایل زیادی به جایگزینی این کنترلرها با کنترلرهای مقاوم وجود دارد. یکی از این کنترل کننده‌ها، کنترلرهای غیرخطی فازی است.

استفاده از کنترل کننده‌های فازی نیازی به اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم ندارد. همچنین کنترل کننده‌های فازی در بسیاری از موارد کنترلی پاسخی بهتر (زمان صعود، بالازدگی، زمان نشست و میزان مقاوم بودن بهینه‌تر) از کنترل‌کننده‌های خطی PI دارند [۱۲]. در این مقاله جهت بهبود عملکرد DSTATCOM در بهبود کاهش فلیکر ولتاژ هر یک از تنظیم‌کننده‌های PI ساختار کنترلر جبران‌کننده با یک تنظیم‌کننده فازی مناسب جایگزین شده است. ساختار تنظیم کننده‌های فازی استفاده شده در کنترلر DSTATCOM در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۳- دیاگرام سیستم کنترل یک DSTATCOM



شکل ۴- دیاگرام تنظیم کننده فازی استفاده شده در ساختار کنترلر DSTATCOM

Archive of SID

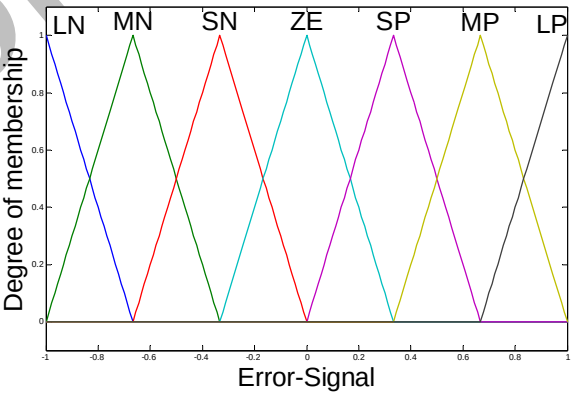
www.SID.ir

مطابق با شکل مشاهده می‌شود که، ابتدا از مقایسه مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده با مقدار پارامتر مرجع، سیگنال خطا تولید می‌شود، در ادامه مشتق این سیگنال نیز بدست می‌آید. سپس از سیگنال‌های خطا و تغییرات خطا به‌عنوان دو ورودی کنترلر فازی استفاده می‌شود. از نماد u به‌طور همزمان برای نشان دادن تک خروجی کنترلر فازی استفاده شده است. در نهایت با استفاده از u سیگنال خروجی تنظیم‌کننده فازی ساخته می‌شود.

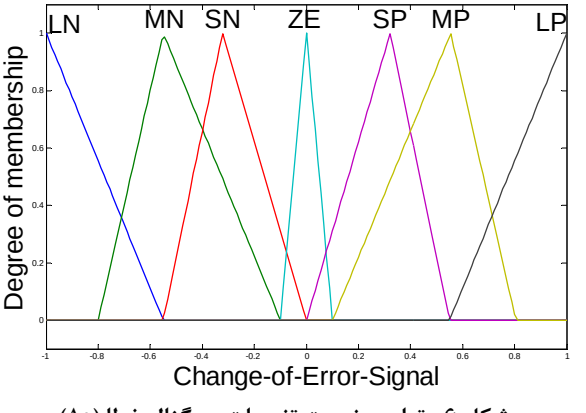
در این قسمت مراحل اصلی طراحی ۴ کنترل‌کننده فازی بکار رفته در تنظیم‌کننده‌های فازی کنترلر DSTATCOM بیان می‌شود [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]:

۵–۱– انتخاب توابع عضویت دو ورودی کنترل‌کننده فازی

توابع عضویت دو ورودی کنترل‌کننده فازی، سیگنال خطا (e) و تغییرات سیگنال خطا (Δe)، مطابق شکل‌های (۵) و (۶) به‌صورت مثلثی انتخاب شده‌اند.



شکل ۵- توابع عضویت سیگنال خطا (e)



شکل ۶- توابع عضویت تغییرات سیگنال خطا (Δe)

F(e) و F(Δe) به‌ترتیب توابع عضویت e و Δe هستند. برای تبدیل متغیرهای عددی به متغیرهای زبانی در هر کنترل کننده فازی حداکثر هفت مجموعه فازی به‌صورت ذیل تعریف شده است:

مثبت بزرگ(LP)، مثبت متوسط (MP)، مثبت کوچک (SP)، صفر (ZE)، منفی کوچک (SN)، منفی متوسط (MN) و منفی بزرگ (LN).

۵–۲– انتخاب نوع سیستم استنتاج فازی و توابع عضویت خروجی

دراین مقاله از سیستم استنتاج فازی نوع تاکاگی کانگ سوگینو در کنترل‌کننده فازی استفاده شده است.

در سیستم استنتاج فازی نوع سوگینو توابع عضویت خروجی توابع خطی برحسب ورودی‌ها [z=a(e)+b(de)+ c] یا توابع ثابت [z=c] هستند. در این مقاله برای خروجی (u) در هر کنترل‌کننده فازی از توابع عضویت خطی با حداکثر هفت مجموعه فازی، مثبت بزرگ (LP)، مثبت متوسط (MP)، مثبت کوچک (SP)، صفر (ZE) ، منفی کوچک (SN)، منفی متوسط (MN) و منفی بزرگ (LN)، استفاده شده است.

۵–۳– انتخاب جدول قوانین تصمیم‌گیری فازی

یک مجموعه از قوانین تصمیم‌گیری که دو ورودی کنترل‌کننده فازی را به خروجی مرتبط می‌کند، در حافظه سیستم استنتاج فازی ذخیره می‌شود.

جداول (۱)، (۲)، (۳) و (۴) به‌ترتیب مجموعه قوانین چهار کنترل‌کننده فازی بکار رفته در تنظیم‌کننده ولتاژ AC (ACVR)، تنظیم‌کننده ولتاژ C (DCVR) و تنظیم‌کننده‌های جریان‌های Iq (IdR) و Id (IqR) را نشان می‌دهند.

جدول ۱- مجموعه قوانین فازی کنترل‌کننده فازی ACVR

	e	Δe	U
1	SN	none	SN
2	SP	none	ZE
3	ZE	LN	MP
4	ZE	MN	SP
5	ZE	SN	MP
6	ZE	ZE	SP
7	ZE	SP	MP
8	ZE	MP	SP
9	ZE	LP	MP

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- مجموعه قوانین فازی کنترل‌کننده فازی DCVR

	e	Δe	U
1	SN	SN	LN
2	SN	ZE	MN
3	SN	SP	SN
4	ZE	SN	ZE
5	ZE	ZE	ZE
6	ZE	SP	ZE
7	SP	SN	SP
8	SP	ZE	MP
9	SP	SP	LP

جدول ۳- مجموعه قوانین فازی کنترل‌کننده فازی IdR

e / Δe	MN	SN	ZE	SP	MP
MN	LN	LN	LN	LN	SP
SN	MN	MN	SN	ZE	MP
ZE	LN	MN	SN	ZE	SP
SP	MN	MN	MP	LP	MP
MP	LN	SP	SP	SP	SP

جدول ۴- مجموعه قوانین فازی کنترل‌کننده فازی IqR

e / Δe	MN	SN	ZE	SP	MP
MN	LN	MN	MN	MN	SP
SN	MN	SN	ZE	SP	MP
ZE	LN	SN	ZE	SP	SP
SP	MN	SN	ZE	SP	MP
MP	LN	MP	MP	MP	SP

۵-۴- اعمال عملگرهای فازی بر روی قسمت مقدم قوانین

ورودی‌های عملگرهای فازی، مقادیر عضویت دو ورودی کنترلرفازی و خروجی آن یک عدد اسکالر است، که با w_i نشان داده می‌شود و نماینگر حاصل مقدم برای قانون i ام است. عملگر فازی مورد استفاده در این مقاله، عملگر AND(min) است، که به‌صورت ذیل عمل می‌نماید:

$$w_i = AndMethod\,(F_i(e) \text{ and } F_i(\Delta e)) = \min(F_i(e), F_i(\Delta e)) \qquad (۵)$$

در فرمول بالا F_i (e) و F_i (Δe) به‌ترتیب توابع عضویت سیگنال خطا (e) و تغییرات سیگنال خطا (Δe) هستند. درصورت نیاز می‌توان از عملگرهای AND(prod)، OR(max) و OR(prodor) نیز استفاده کرد.

۵-۵- نافازی‌سازی جهت بدست آوردن خروجی نهایی کنترل‌کننده فازی

سطح تراز خروجی z_i هر قانون با قدرت عملکرد w_i وزن‌دار می‌شود و خروجی نهایی سیستم استنتاج فازی از روش میانگین وزنی تمام خروجی‌های قوانین به‌صورت ذیل بدست می‌آید:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i . z_i}{\sum_{i-1}^{N} w_i} \qquad (۶)$$

در فرمول فوق، u خروجی کنترل‌کننده فازی، N نشان‌دهنده تعداد قوانین سیستم استنتاج فازی سوگینو و z_i تابع عضویت خطی تنها خروجی قانون i ام که متناظر با توابع عضویت F_i (e) و F_i (Δe) است.

۶- سیستم توزیع مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه شامل یک DSTATCOM با ظرفیت ±3MVar بر روی یک شبکه توزیع25kv است. شکل (۷) را یک دیاگرام شبیه‌سازی شامل DSTATCOM و شبکه توزیع نشان می‌دهد [۱۷].

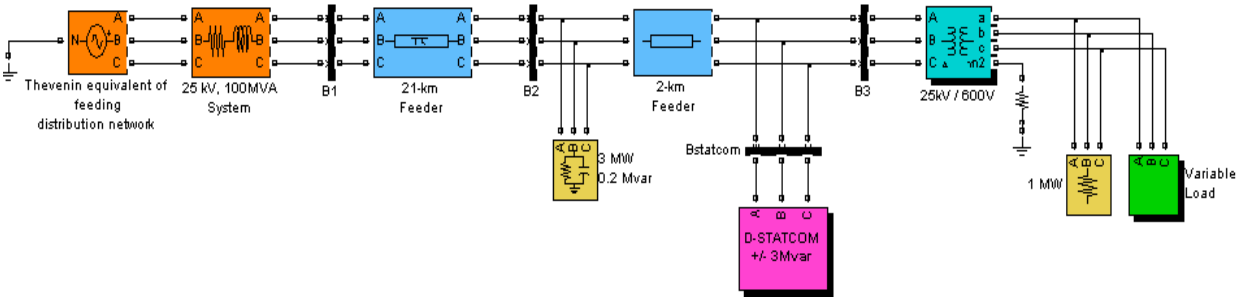
شبکه فوق توزیع به‌وسیله مدار معادل تونن با ولتاژ درونی ثابت نشان داده شده است. خطوط تغذیه 2km و 21km توان را به بارهای متصل شده در باس‌های B2 و B3 منتقل می‌کنند. از یک خازن موازی در باس B2 جهت تصحیح ضریب توان استفاده شده است.

یک بار متغیر 600V از طریق یک ترانسفورماتور 25KV/600V به باسB3 متصل شده است. این بار متغییر یک منبع جذب جریان‌های متغیر پیوسته را فراهم می‌کند که عامل به وجود آورنده فلیکر ولتاژ در باس B3 است. دامنه جریان بار متغیر با فرکانس 5Hz تغییر می‌کند، که این امر موجب تغییرات توان بار از 1MW تا 5.2MW با ضریب توان پس فاز متغیر می‌شود.

وظیفه DSTATCOM کاهش أثر پدیده فلیکر ولتاژ در باس B3 به‌وسیله‌ی جذب یا تزریق توان راکتیو است. جهت رسیدن به‌سرعت قابل قبول در شبیه‌سازی و بهبود عملکرد دینامیکی DSTATCOM این مدل با زمان نمونه‌برداری نسبتاً کوچکی (Ts=5μs)، discrete است.

Archive of SID

www.SID.ir

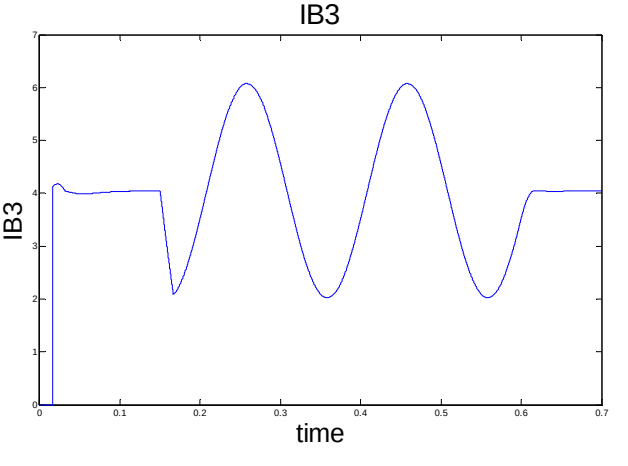


شکل ۷- دیاگرام شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه

دراین قسمت توانایی یک DSTATCOM، با دو نوع روش کنترلی در کاهش أثر پدیده فلیکر ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ساختار تنظیم کننده‌های درونی و بیرونی کنترلر DSTATCOM در مرحله اول از کنترل‌کننده‌های PI و در مرحله‌ی بعد از کنترل کننده‌های فازی استفاده شده است.

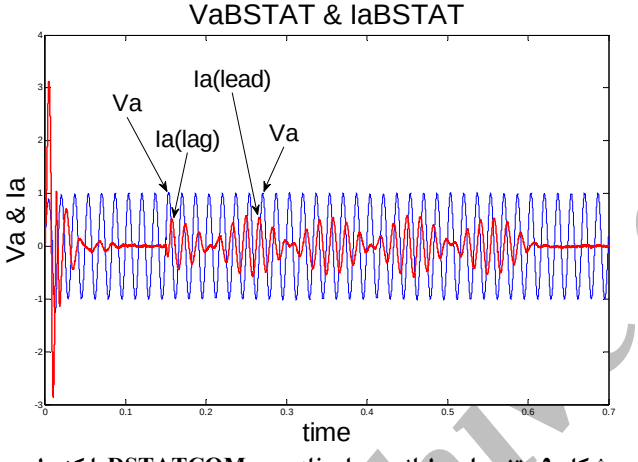
۶-۱- نتایج شبیه‌سازی

در ابتدای شبیه‌سازی بار متغیر غیرفعال است. در این حالت DSTATCOM نیز غیرفعال است و مقدار دامنه ولتاژ باس B3، 1 p.u است. در لحظه‌ی t=0.15 s با فعال شدن بار متغیر با ضریب توان پس‌فاز، DSTATCOM نیز فعال می‌شود و به‌طور تناوبی مانند یک سلف یا یک خازن متناسب با تغییرات جریان و توان راکتیو بار متغیر، توان راکتیو جذب یا تزریق می‌کند، تا در محل باس B3 اثر پدیده فلیکر ولتاژ را تعدیل نماید و ولتاژ این باس را در 1p.u تنظیم کند. پس از غیرفعال شدن بار متغیر در لحظه‌ی t=0.6 s، جبران‌کننده نیز غیرفعال می‌شود. شکل (۸)، تغییرات جریان ناشی از تغییرات بار در باس B3 را نشان می‌دهد:

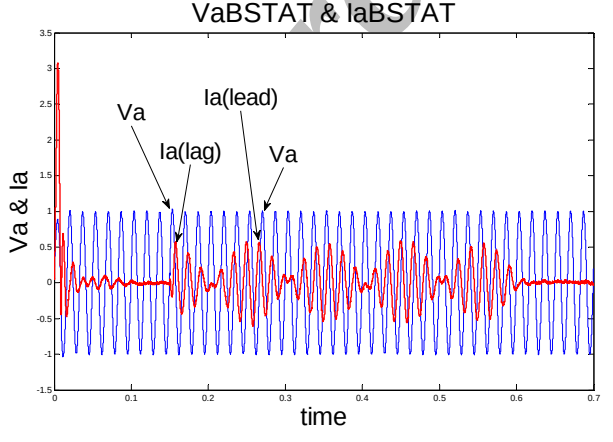


شکل ۸- تغییرات جریان فاز a در باس B3 به ازای اعمال تغییرات بار

شکل‌های (۹) و (۱۰) برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی تغییرات ولتاژ و جریان فاز a جبرانگر را نشان می‌دهند.



شکل ۹- تغییرات ولتاژ وجریان فاز a در DSTATCOM با کنترلر PI به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3



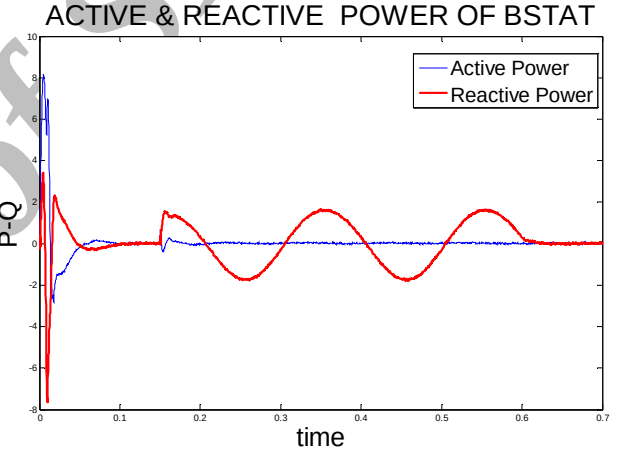
شکل ۱۰- تغییرات ولتاژ وجریان فاز a در DSTATCOM با کنترلر فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

Archive of SID

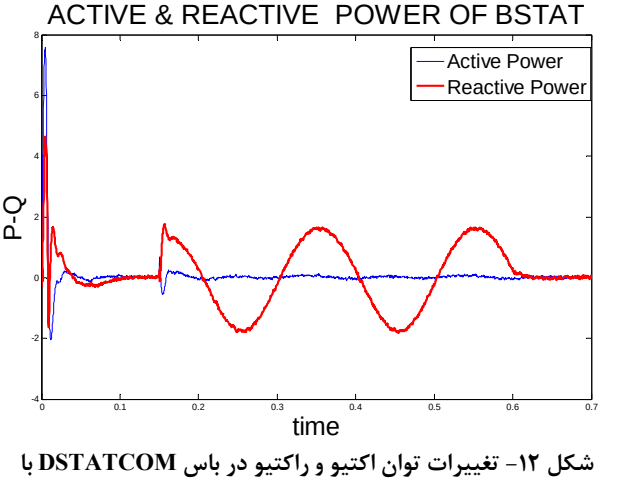
www.SID.ir

مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) ملاحظه می‌شود که، برای هر دو کنترل‌کننده ماهیت عملکرد جبرانگر متناسب با تغییرات بار به‌طور تناوبی تغییر کرده است و همچنین نوسانات گذرای جریان در ابتدای شبیه‌سازی برای جبران‌کننده با کنترلر فازی، کمتر است.

با توجه به شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود که، در حالت گذرا تغییرات توان اکتیو و راکتیو در بار باس جبران‌کننده برای DSTATCOM باکنترل‌کننده فازی محدودتر است، همچنین بعد از فعال شدن بار متغییر در لحظه‌ی t=0.15 s کنترل‌کننده فازی همانند کنترل‌کننده PI به‌خوبی از عهده جبران‌سازی توان اکتیو و توان راکتیو متناسب با تغییرات بار، برآمده است.محدوده تغییرات توان راکتیو DSTATCOM برای جبران‌سازی بار از -1.85MVar تا +1.65MVar است.

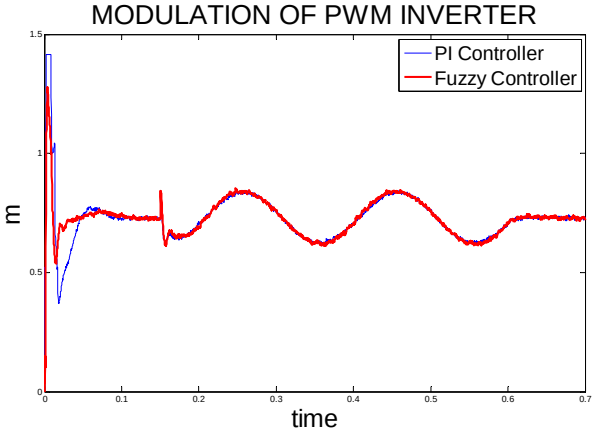


شکل ۱۱- تغییرات توان اکتیو و راکتیو در باس DSTATCOM با کنترلر PI به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3



شکل ۱۲- تغییرات توان اکتیو و راکتیو در باس DSTATCOM با کنترلر فازی به ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

شکل (۱۳) تغییرات شاخص مدولاسیون (m) به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3، را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی متناسب با افزایش بار و در حین تغییر عملکرد DSTATCOM از حالت سلفی به خازنی، شاخص مدولاسیون (m) افزایش می‌یابد. همچنین مقدار فراجهش شاخص مدولاسیون در حالت گذرای ابتدای شبیه‌سازی برای کنترلر فازی کمتر است.



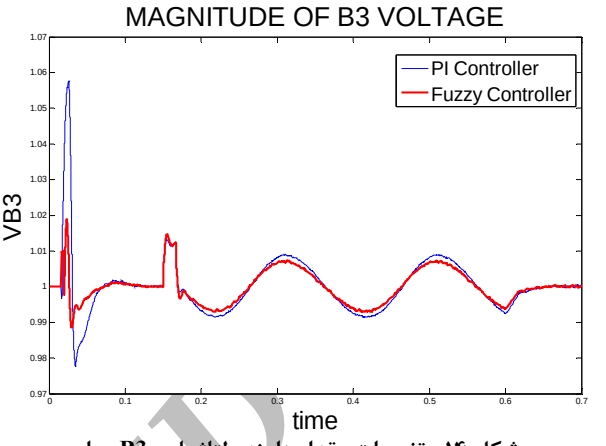
شکل ۱۳- تغییرات شاخص مدولاسیون (m) اینورتر PWM، برای DSTATCOM با کنترلرPI و فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

در این مقاله، هدف از بکارگیری DSTATCOM در شبکه توزیع، جبران‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو متناسب با تغییرات بار به‌منظورکاهش فلیکر ولتاژ در باس B3 است. شکل (۱۴) تغییرات دامنه ولتاژ باس B3 را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی نشان می‌دهد.

در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که نوسانات دامنه ولتاژ باس B3 برای کنترل‌کننده فازی در ابتدای شبیه‌سازی کمتر است، همچنین تغییرات ولتاژ (فلیکر ولتاژ) برای کنترل‌کننده خطی PI از 0.991 p.u (-0.009%) تا 1.009p.u (+0.009%) است، درحالی‌که همین نوسانات برای کنترلر فازی از 0.993 p.u (-0.007%) تا 1.007p.u (+0.007%) است. این امر به معنی آن است که کاهش فلیکر ولتاژ با استفاده از DSTATCOM فازی، بهبود یافته است.

Archive of SID

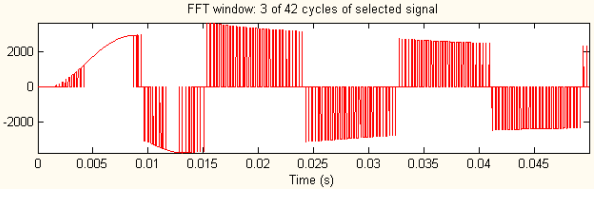
www.SID.ir



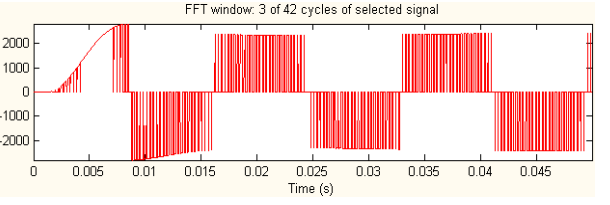
شکل ۱۴- تغییرات مقدار دامنه ولتاژ باس B3، برای DSTATCOM با کنترلر PI و فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار

۶-۲- تحلیل هارمونیکی

در این قسمت با استفاده از تابع FFT بلوک powergui برای ولتاژ خروجی اینورتر PWM (Va-inv) و ولتاژ تغذیه‌کننده شبکه توزیع (VB1) تحلیل هارمونیکی انجام شده است. برای هر طیف هارمونیکی مقدار مجموع اعوجاجات هارمونیکی (T.H.D) و مرتبه هارمونیک‌ها مشخص می‌شوند. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی اینورتر برای سه سیکل ابتدای شبیه‌سازی (از کل ۴۲ سیکل مدت شبیه‌سازی) را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی نشان می‌دهند.



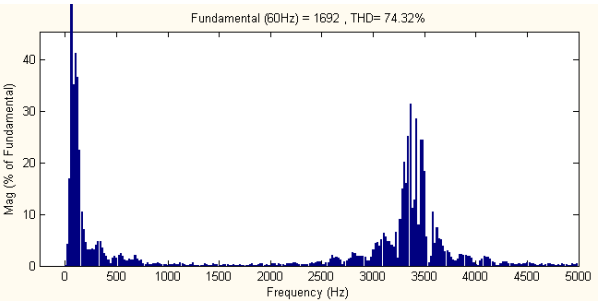
شکل ۱۵- سه سیکل ابتدایی ولتاژ خروجی اینورتر PWM برای کنترلر PI به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3



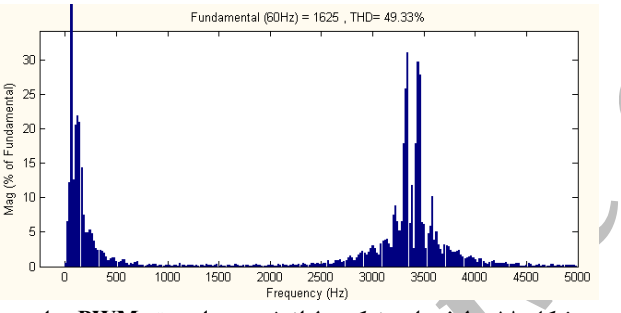
شکل ۱۶- سه سیکل ابتدایی ولتاژ خروجی اینورتر PWM برای کنترلر فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی اینورتر را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی نشان می‌دهند.

طبق این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که مقدار T.H.D ولتاژ خروجی اینورتر PWM در کنترل‌کننده PI (74.32%) بیشتر از مقدار T.H.D درکنترلرفازی (49.33%) است، یعنی مؤلفه‌های هارمونیکی تزریق شده به شبکه توزیع در DSTATCOM فازی کمتر است.

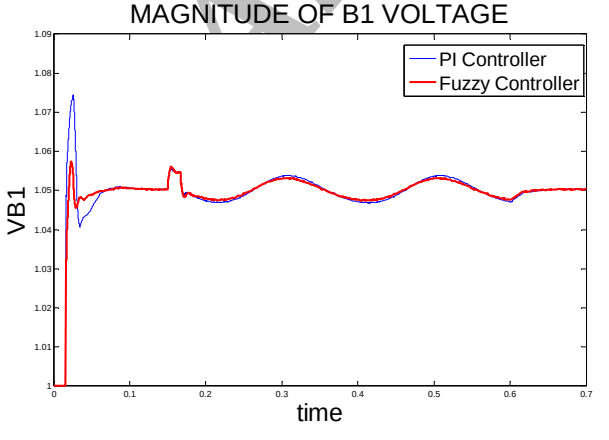


شکل ۱۷- طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی اینورتر PWM، برای جبرانگر با کنترلر PI به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3



شکل ۱۸- طیف‌هارمونیکی ولتاژ خروجی اینورتر PWM، برای جبرانگر با کنترلر فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

شکل (۱۹) تغییرات دامنه ولتاژ تغذیه کننده شبکه‌ی توزیع (VB1) را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی نشان می‌دهد.

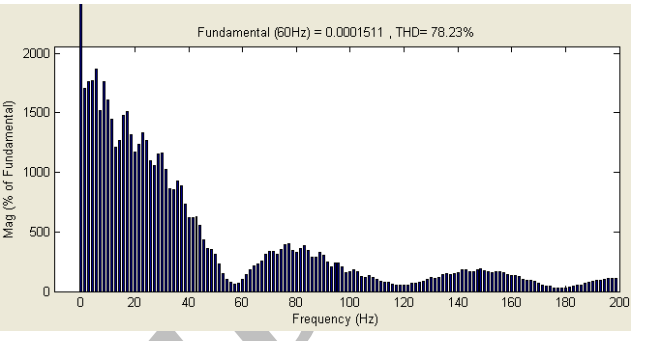


شکل ۱۹- تغییرات مقدار دامنه ولتاژ باس B1، برای جبرانگر با کنترلر PI و فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

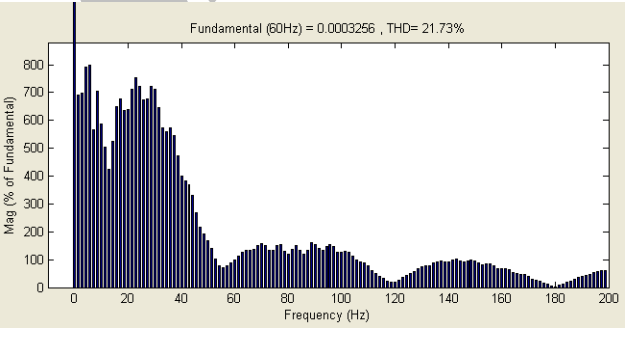
Archive of SID

www.SID.ir

شکل‌های (۲۰) و (۲۱) طیف هارمونیکی VB1 را برای هر دو نوع کنترلر PI و فازی نشان می‌دهند.



شکل ۲۰- طیف هارمونیکی ولتاژ باس B1، برای DSTATCOM با کنترلر PI به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3



شکل ۲۱- طیف‌هارمونیکی ولتاژ باس B1، برای DSTATCOM با کنترلر فازی به‌ازای اعمال تغییرات بار در باس B3

مشاهده می‌شود که مقدار T.H.D ولتاژ باس B1 برای کنترلر فازی (21.73%) از مقدارT.H.D برای همان ولتاژ باکنترلر PI (78.23%) کمتر است، بنابراین استفاده از کنترلر فازی مؤلفه‌های هارمونیکی غیرمفید تزریق شده به شبکه فوق توزیع را کاهش داده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله توانایی یک DSTATCOM با دو نوع کنترل‌کننده PI و فازی، در کاهش فلیکر ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ابتدا ساختار کنترلر اینورتر جبران‌کننده تشریح شده است، سپس تنظیم‌کننده‌های فازی مناسب برای این کنترلر طراحی شده‌اند.

مشاهده می‌شود که، DSTATCOM با کنترلر فازی باعث کاهش نوسانات گذرای ابتدای شبیه‌سازی و بهبود کاهش فلیکر ولتاژ در شبکه‌ی توزیع می‌گردد. همچنین مشخص می‌شود که تنظیم‌کننده‌های فازی باعث تولید اعوجاجات هارمونیکی کمتری در ولتاژ خروجی اینورتر جبران‌کننده می‌شوند، که این امر نیز موجب کاهش ۵۰ درصدی مؤلفه‌های هارمونیکی تزریق شده به شبکه فوق توزیع می‌شود.

۸- مراجع

[1] J. A. Martinez, J. Martin-Arnedo; **"Voltage Sag Studies in Distribution Networks-PartII: Voltage Sag Assessment"**, IEEE Trns. Power Del., Vol. 21, No. 3, pp.1679-1688, Jul. 2006.

[2] Elnady, M. A. Salama; **"Unified Approach for Mitigation Voltage Sag and Voltage Flicker Using the DSTATCOM",** IEEE Trns. Power Del., Vol. 20, No. 2, pp.992-1000, 2005.

[3] Ghosh, G. Ledwich; **"Application of Power Electronics to Power Disturtion Systems"**, IEEE Tutorial Course, 2006.

[4] Y. H. Chrmg, G. H. Kwon, T. B. Park; **"Voltage Sag and Swell Generator for the Evaluation of Custom Power Device"**, IEEE Conference, pp.2503-2507, 2003.

[5] Ghosh, G. Ledwich; "**Load compensating DSTATCOM in weak AC systems",** IEEE Trns. Power Del., Vol. 18, Issue: 4, pp.1302-1309, Oct. 2003.

[6] H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed, S. Yusuf; "**Design of a Prototype DSTATCOM for Voltage Sag Mitigation"**, IEEE Notional Power and Energy Conference, pp.61-66, Nov.2004.

[7] P. S. Sensarma, K. R. Padiyar, V. Ramnarayanan; "**Analysis and Performance Evaluation of a Distribution STATCOM for Compensating Voltage Fluctuation**", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 259-264, April 2001.

[8] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Gavallini, L. Piti, D. Zaninelli; "**Arc Furnance Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks**", IEEE Trns. Power Delivery, Vol. 9, pp.2026-2036, 1994.

۹- پی‌نوشت‌ها

1- Programmable Logic Controller
2- Thyristor Controlled Reactors
3- Thyristor Switched Capacitors
4- Distribution STAtic synchronous COM pensator
5- Proportional Integral
6- Sinuousidal Pulse Width Modulation
7- Voltage Sourced Inverter
8- Isolated Gaite Bipolar Transistore

Archive of SID

www.SID.ir

9- current direct axis component
10- current quadrature axis component
11- AC Voltage Regulator
12- DC Voltage Regulator
13- Iq Regulator
14- Id Regulator

Archive of SID

www.SID.ir