

یک روش جدید مبتنی بر کنترل حلقه بسته بازباننده ولتاژ دینامیکی

مجید دلشاد^۱، بهادر فانی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان، delshad@khuisf.ac.ir

^۲دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، fani@ec.iut.ac.ir

چکیده

تحقیقات زیادی بر روی استراتژیهای کنترلی حلقه باز DVR انجام شده است. هرچند کنترل حلقه باز دارای پاسخ دینامیکی سریعی می باشد اما بواسطه وجود فیلتر DVR، شکل موج ولتاژ بار دارای نوسانات شدید با بالازدگی زیاد و میرایی ضعیف می باشد. تمام روشهای پیشنهادی DVR مبتنی بر کنترل حلقه بسته کلاسیک (پس خور ولتاژ بار) هستند و با استفاده از مدولاسیون سینوسی و در مختصات abc پیاده سازی شده اند. هدف از این مقاله اجرای استراتژی حداقل انرژی با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی می باشد. بدین منظور الگوریتم جدیدی برای پیاده سازی استراتژی حداقل انرژی در مختصات dq پیشنهاد می شود. سپس با توجه به میرایی ضعیف پاسخ دینامیکی کنترل حلقه باز DVR و خطای حالت مانای آن، برای بهبود مشخصه های پاسخ دینامیکی و کاهش خطای حالت ماندگار از کنترل حلقه بسته با پس خور ولتاژ بار و حلقه داخلی با پس خور جریان خازن فیلتر DVR استفاده می شود.

کلید واژه: مدولاسیون بردار فضایی - DVR - حداقل انرژی - کنترل حلقه بسته.

۱-مقدمه

در بین اختلالات ولتاژ، کمبودهای ولتاژ بطور خاص مشکل ساز بوده اند. کمبود ولتاژ به کاهش کوتاه مدت در دامنه ولتاژ منبع اتلاق می شود. مدت این اغتشاش بطور معمول بین ۰/۵ سیکل تا ۳۰ سیکل می باشد [۱]. اغلب کمبودهای ولتاژ بواسطه وقوع خطاها در سیستم قدرت یا بخاطر راه اندازی موتورهای القائی بزرگ ایجاد می شوند و تا زمان رفع خطا توسط یک وسیله حفاظتی یا افزایش سرعت موتور به طول می انجامند [۲].

کمبودهای ولتاژ بیشترین سهم تأثیر اختلالات ولتاژ را بر مصرف کنندگان دارند. یک کمبود ولتاژ با تداوم چند سیکل کافی است تا موجب توقف فرآیندهای صنعتی حساس شود. ضررهای مالی متعاقب آن می تواند به میلیونها دلار در سال برسد [۳]. این ضررها شامل توقف تولید برای زمان طولانی، از بین رفتن مواد در حال تولید، خرابی تجهیزات و راه اندازی مجدد خط تولید می باشد. بنابراین از دیدگاه مشتری، کمبود و وقفه ولتاژ ممکن است اثرات مشابهی روی فرآیندهای صنعتی داشته باشند. از آنجایی که کمبودهای ولتاژ در نقاط بسیار دورتر از محل خطا نیز حس می شوند، بسیار بیشتر از وقفه ها تکرار می شوند. لذا توجه خاصی به کاهش اثرات کمبود ولتاژ گردیده است [۴ و ۵].

به منظور جبران کمبودهای ولتاژ بوجود آمده در ولتاژ منبع، به استفاده از ادوات Custom Power سری در سیستمهای توزیع توجه خاصی شده است. این جبرانگر، بازباننده دینامیکی ولتاژ (DVR) نامیده شده است. DVR سعی می کند ولتاژ بار را در صورت وقوع تغییرات در ولتاژ منبع با تزریق ولتاژ از دست رفته ثابت نگه دارد. از مزایای DVR این است که نیاز به توان نامی کمتر از بار نامی دارد و بنابراین از نظر اقتصادی توجیه پذیر است. DVR بخاطر قابلیت های دینامیکی ممتاز، یک وسیله مناسب برای حفاظت بارهای حساس در مقابل کمبود و بیشبود ولتاژ می باشد. این راه حل توسط کارخانجات صنعتی که نیاز به کیفیت توان بالایی دارند مورد توجه قرار گرفته است زیرا به این ترتیب حفاظت کل کارخانه در برابر کمبودهای ولتاژ از طریق نصب فقط یک وسیله فراهم می شود. عیب مهم DVR عدم حفاظت بار در برابر وقفه ها می باشد.

تحقیقات زیادی بر روی استراتژیهای کنترلی حلقه باز DVR انجام شده است. از جمله در [۷۰۶] استراتژیهای کنترلی همفاز، حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال و حداقل انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹۰۸] استراتژی کنترلی همفاز تدریجی حلقه باز مبتنی بر مدولاسیون فضایی پیشنهاد و بطور عملی پیاده‌سازی شده است. اصول نظری روش حداقل انرژی در [۱۰] آمده است و الگوریتمی مشهور به روش فاز پیشرو برای اجرای حداقل انرژی در کمبودهای متعادل و نامتعادل پیشنهاد شده است. در [۱۱] اصلاحاتی در الگوریتم فاز پیشرو انجام و بصورت حلقه باز پیاده‌سازی شده است.

هرچند کنترل حلقه باز دارای پاسخ دینامیکی سریعی می‌باشد اما بواسطه وجود فیلتر DVR، شکل موج ولتاژ بار دارای نوسانات شدید با بالازدگی زیاد و میرایی ضعیف می‌باشد. ضعف میرایی و در نتیجه طولانی شدن نوسانات ولتاژ در شبکه توزیع می‌تواند اثرات نامطلوبی روی بارها و تجهیزات حساس مانند درایوهای تنظیم سرعت داشته باشد. عیب دیگر استفاده از کنترل حلقه باز، وجود خطای دائمی در ولتاژ بار نسبت به ولتاژ مرجع است. در کنترل حلقه باز، هیچ اطلاعی از مقدار ولتاژ بار وجود ندارد و بواسطه افت ولتاژ در ترانسفورماتورهای تزریق و فیلتر، ولتاژ بار دارای خطای حالت مانا می‌شود. با اعمال کنترل حلقه بسته می‌توان علاوه بر کاهش خطای دائمی، پاسخ دینامیکی سیستم را بهبود بخشید [۱۲].

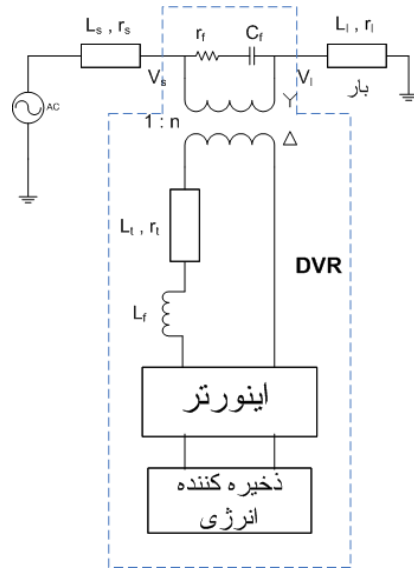
هدف از این مقاله اجرای استراتژی حداقل انرژی با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی می‌باشد. بدین منظور الگوریتم جدیدی برای پیاده‌سازی استراتژی حداقل انرژی در مختصات dq پیشنهاد می‌شود. سپس با توجه به میرایی ضعیف پاسخ دینامیکی کنترل حلقه باز DVR و خطای حالت مانای آن، برای بهبود مشخصه‌های پاسخ دینامیکی و کاهش خطای حالت ماندگار از کنترل حلقه بسته با پس‌خور ولتاژ بار و حلقه داخلی با پس‌خور جریان خازن فیلتر DVR استفاده می‌شود.

۲- کنترل حلقه بسته DVR

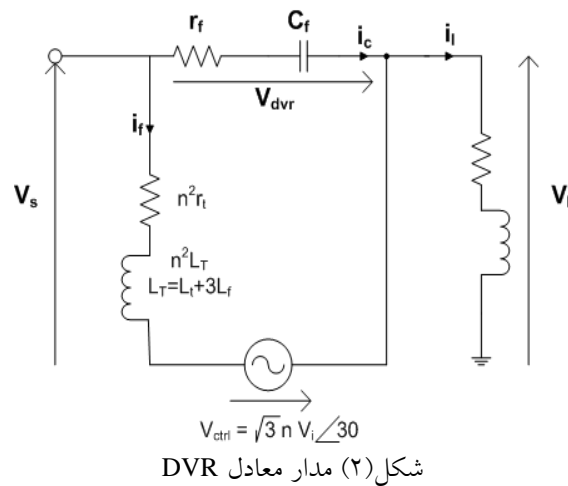
۲-۱- توصیف فضای حالت DVR

نقطه شروع طراحی کنترل‌کننده برای سیستمهای خطی، بدست آوردن مدل ریاضی برای سیستم می‌باشد. در طراحی‌های کلاسیک از مدل فرکانسی یا توابع تبدیل سیستم استفاده می‌شود. اما در نظریه کنترل مدرن، از توصیف فضای حالت و از معادلات دیفرانسیل برای مدلسازی سیستمهای دینامیکی استفاده می‌شود. این روش دارای این مزیت است که سیستمهای غیرخطی، متغیر با زمان و چند ورودی - چند خروجی را می‌توان توسط آن مدلسازی کرد. برای بدست آوردن معادلات دیفرانسیل سیستم DVR، در ابتدا لازم است مدل مداری مناسبی برای آن در نظر گرفته شود.

شکل (۱) ساختمان قدرت DVR متصل به شبکه توزیع را نشان می‌دهد. در این شکل، بار دارای اندوکتانس L_l و مقاومت r_l ، فیلتر دارای اندوکتانس L_f ، مقاومت r_f و خازن C_f و ترانسفورماتورهای تزریق با اتصال مثلث - ستاره باز دارای مقاومت سیم‌پیچی r_t ، اندوکتانس پراکندگی L_t و نسبت دور $1:n$ می‌باشند. بواسطه حضور کلیدهای الکترونیک قدرت در اینورتر، DVR یک وسیله غیرخطی می‌باشد. هرچند می‌توان با استفاده از روش میانگین فضای حالت، رفتار DVR را بیان کرد اما در اینجا با فرض ایده‌آل بودن اینورتر، آنرا بصورت یک منبع ولتاژ (V_f) مدل می‌کنیم. مشخصه دینامیکی DVR به میزان زیادی توسط فیلتر، ترانسفورماتورهای تزریق و بار تعیین می‌شود. شکل (۲) مدار معادل DVR را نشان می‌دهد. در این مدار معادل تمام عناصر به سمت ثانویه ترانسفورماتورهای تزریق ارجاع داده شده‌اند.



شکل (۱) مدار قدرت DVR متصل به شبکه



شکل (۲) مدار معادل DVR

با توجه به مدار معادل بدست آمده، معادلات فضای حالت بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$[v_{ctrl}]_{abc} = [v_{dvr}]_{abc} + n^2 r_l [i_f]_{abc} + n^2 L_T \frac{d}{dt} [i_f]_{abc} \quad (1)$$

$$[v_l]_{abc} = r_l [i_l]_{abc} + L_l \frac{d}{dt} [i_l]_{abc} \quad (2)$$

$$[v_{dvr}]_{abc} = [v_l]_{abc} - [v_s]_{abc} \quad (3)$$

$$[v_{dvr}]_{abc} = -[v_c]_{abc} - r_f [i_c]_{abc} \quad (4)$$

$$[i_c]_{abc} = C_f \frac{d}{dt} [v_c]_{abc} \quad (5)$$

برای بدست آوردن توصیف فضای حالت سیستم به فرم استاندارد و با توجه به عملکرد DVR و مباحث مداری، ورودی‌ها، خروجی‌ها و

متغیرهای حالت سیستم بصورت $y = [V_{dvr}]_{abc}$ ، $u = [V_{ctrl}]_{abc}$ و $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_f]_{abc} \\ [I_l]_{abc} \\ [V_c]_{abc} \end{bmatrix}$ تعریف می‌شوند که u ورودی، y

خروجی و x متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. $w = [V_s]_{abc}$ نیز به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. با این تعاریف و معادلات

فوق، نمایش فضای حالت به صورت زیر در خواهد آمد :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ew \\ y = Cx \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن :

$$C = [r_f \quad -r_f \quad -1] \text{ و } E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L_l \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ n^2 L_T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -(\frac{r_f}{n^2 L_T} + \frac{r_l}{L_T}) & \frac{r_f}{n^2 L_T} & \frac{1}{n^2 L_T} \\ \frac{r_f}{L_l} & -\frac{r_f + r_l}{L_l} & -\frac{1}{L_l} \\ -\frac{1}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}$$

با توجه به اینکه تاکنون از چارچوب dq برای محاسبه ولتاژهای خطا استفاده کرده ایم و نحوه کلید زنی اینورتر بر مبنای مدولاسیون بردار فضایی است، از طرفی بعلت سادگی کار کردن با مقادیر dc بجای شکل موجهای سینوسی، روشهای کنترلی در مختصات dq طراحی و پیاده سازی می شوند. لذا با انتقال معادلات فضای حالت فوق به دستگاه dq، تنها ماتریس حالت A بصورت زیر تغییر می کند :

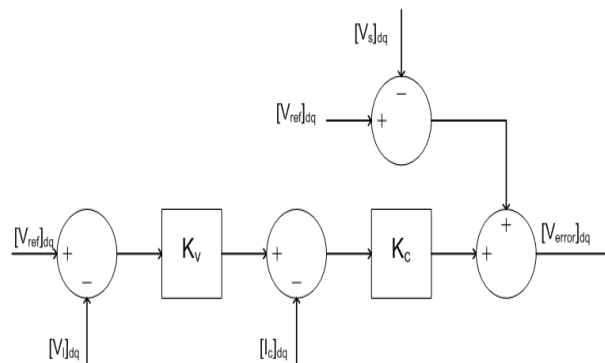
$$A = \begin{bmatrix} -(\frac{r_f}{n^2 L_T} + \frac{r_l}{L_T})\Psi - \omega\Phi & \frac{r_f}{n^2 L_T}\Psi & \frac{1}{n^2 L_T}\Psi \\ \frac{r_f}{L_l}\Psi & -\frac{r_f + r_l}{L_l}\Psi - \omega\Phi & -\frac{1}{L_l}\Psi \\ -\frac{1}{C_f}\Psi & \frac{1}{C_f}\Psi & -\omega\Phi \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که در آن $\omega = 100\pi$ ، $\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ و $\Phi = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ است.

حال از نمایش فضای حالت فوق می توان به منظور طراحی کنترل DVR برای رسیدن به پاسخ دینامیکی مطلوب استفاده کرد. در ادامه به بررسی مشخصه های دینامیکی کنترل حلقه باز می پردازیم و عملکرد DVR را از لحاظ پایداری، خطای حالت ماندگار و میرایی مطالعه می کنیم.

۲-۲- پیاده سازی کنترل حلقه بسته DVR با پس خور جریان

شکل (۴) نحوه پیاده سازی کنترل حلقه بسته DVR با پس خورد جریان خازن را نشان می دهد. مطابق شکل، ابتدا ولتاژ بار با ولتاژ مرجع مقایسه شده و خطای حاصل در یک بهره خطای ولتاژ K_v ضرب می شود. نتیجه حاصل شده بعنوان یک سیگنال مرجع برای تنظیم جریان فیلتر خازن استفاده می شود. این جریان مرجع مجازی با جریان واقعی خازن مقایسه شده و خطای جریان در یک بهره خطای جریان K_c ضرب می شود. سپس این مقدار با خطای حاصل از حلقه پیش خور جمع شده و حاصل مشابه روش حلقه باز بعد از تقسیم بر $n\sqrt{3}$ توسط زاویه $\theta - 30$ درجه به دستگاه $\alpha\beta$ برده می شود و به مولد SVPWM برای تولید پالسهای اینورتر فرستاده می شود.



شکل (۴) پیاده سازی کنترل حلقه بسته DVR با پس خور جریان

نکته‌ای که می‌تواند جالب باشد این است که در کنترل حلقه بسته مانند کنترل حلقه باز می‌توان با تعیین مناسب مقادیر مرجع، استراتژیهای کنترلی مطرح شده در فصل قبل را با همان الگوریتمها و بدون هیچ تغییری اعمال کرد. بدین ترتیب می‌توان با بکارگیری استراتژی کنترلی حداقل انرژی در کنترل حلقه بسته علاوه بر رسیدن به هدف استراتژی، نوسانات شدید ناشی از پرش زیاد فاز را در پاسخ سیستم بمیزان زیادی بهبود داد.

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی کنترل حلقه بسته DVR با پس‌خور جریان

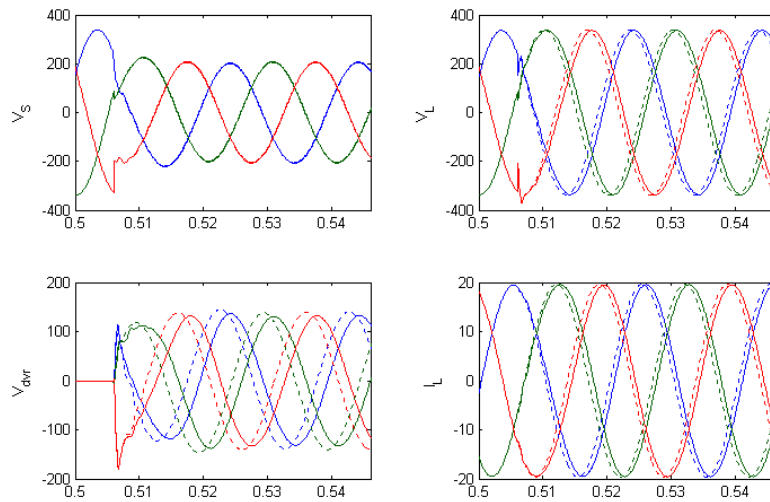
به منظور مشاهده عملکرد DVR با کنترل حلقه بسته شبیه‌سازیهای بر روی سیستم تحت مطالعه و در کمبودهای ولتاژ متعادل و نامتعادل انجام شد. در هر حالت، استراتژیهای کنترلی DVR یعنی حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال، همفاز و حداقل انرژی معرفی شده در فصل قبل در کنترل حلقه بسته DVR اعمال گردید. زمان شروع کمبودهای ولتاژ در این شبیه‌سازیها ۰/۵۰۶ ثانیه است. شکل (۵) عملکرد کنترل حلقه بسته DVR با استراتژیهای کنترلی حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال و همفاز را تحت کمبود سه‌فاز ۴۰٪ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نوسانات ولتاژ بار موجود در ابتدای اختلال در کنترل حلقه باز، در روش حلقه بسته سریعاً میرا شده است و بالازدگی ولتاژ بار کاهش یافته است. همچنین صحت عملکرد استراتژیهای کنترلی نیز در این شکل مشاهده می‌شود بطوریکه بواسطه تعقیب فاز ولتاژ منبع بعد از اختلال در روش همفاز، دامنه ولتاژ تزریقی در این روش نسبت به روش حفظ ولتاژ کوچکتر شده است.

شکل (۶) مقایسه‌ای بین استراتژیهای کنترلی حفظ ولتاژ و حداقل انرژی پیشنهادی در کنترل حلقه بسته DVR تحت کمبود سه‌فاز ۴۰٪ صورت گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود با وجود پرش فاز نسبتاً زیاد در ولتاژ دو سر بار، نوسانات ولتاژ بار بسیار ناچیز است. همچنین این شکل صحت عملکرد استراتژی کنترلی حداقل انرژی در کنترل حلقه بسته را نشان می‌دهد بطوریکه دامنه ولتاژ تزریقی در استراتژی حداقل انرژی به مراتب بزرگتر از استراتژی حفظ ولتاژ است.

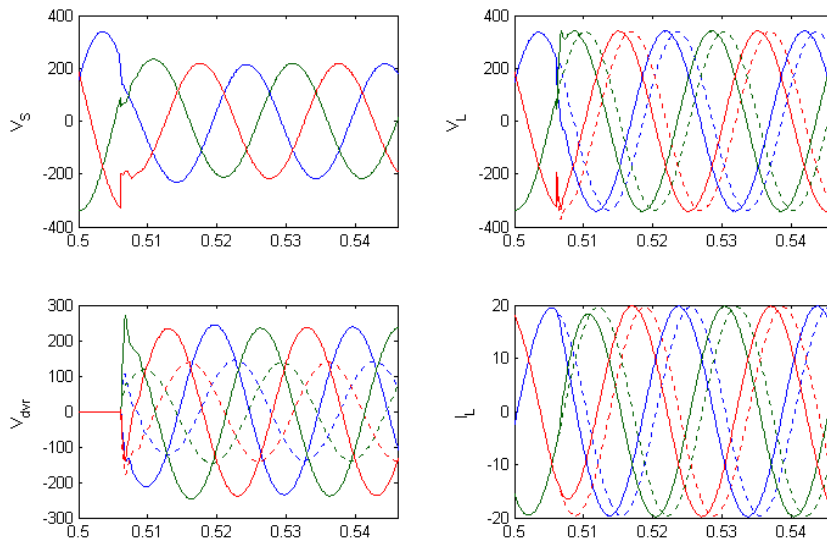
در شکل (۶) توانهای تزریقی DVR در کنترل حلقه باز و حلقه بسته و با استراتژیهای کنترلی مختلف تحت یک کمبود سه‌فاز ۴۰٪ مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود توانهای تزریقی در همفاز بیشترین مقدار و در حداقل انرژی کمترین مقدار را دارد. می‌توان مشاهده کرد که توانهای تزریقی در کنترل حلقه بسته کمی بزرگتر از حلقه باز است. علت این امر تزریق ولتاژهای بزرگتر در کنترل حلقه بسته به منظور کاهش افت ولتاژ دو سر بار جبران شده است.

۳- نتیجه‌گیری

تمام روشهای پیشنهادی مبتنی بر کنترل حلقه بسته کلاسیک (پس‌خور ولتاژ بار) هستند و با استفاده از مدولاسیون سینوسی و در مختصات abc پیاده‌سازی شده‌اند. هدف از این طرح در ابتدا اجرای استراتژی حداقل انرژی با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی می‌باشد. بدین منظور دو الگوریتم جدید برای پیاده‌سازی استراتژی حداقل انرژی در مختصات dq پیشنهاد شد. سپس با توجه به میرایی ضعیف پاسخ دینامیکی کنترل حلقه باز DVR و خطای حالت مانای آن، برای بهبود مشخصه‌های پاسخ دینامیکی و کاهش خطای حالت ماندگار از کنترل حلقه بسته با پس‌خور ولتاژ بار و حلقه داخلی با پس‌خور جریان خازن فیلتر DVR استفاده شد.



شکل (۵) مقایسه عملکرد کنترل حلقه بسته DVR با استراتژیهای حفظ ولتاژ و همفاز تحت کمبود متعادل ۴۰٪



شکل (۶) مقایسه عملکرد کنترل حلقه بسته DVR با استراتژیهای حفظ ولتاژ و حداقل انرژی تحت کمبود متعادل ۴۰٪

مراجع

- [1] Zhang, Y.H., Viathgamuwa, D.M. and Choi, S.S., "An experimental investigation of dynamic voltage restorer (DVR)", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.4, pp. 2745-2750, 2000.
- [2] IEEE Project Working Group, "Electric power system compatibility with industrial process equipment. I. Voltage sags", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference IEEE, pp.261-266, 1994.
- [3] Sree, H. and Mohan, N., "Voltage sag mitigation using a high-frequency-link cycloconverter-based DVR", 26th Annual Conference of the IEEE, Vol.1, pp. 344-349, 2000.
- [4] Middlekauff, S.W. and Collins, E.R., "System and customer impact: considerations for series custom power devices", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.13, No.1, pp. 278-282, 1998.
- [5] Bollen, M.H.J., "Voltage sags: effects, mitigation and prediction", Power Engineering Journal, Vol.10, No.3, pp. 129-135, 1996.
- [6] Nielsen, J.G., Blaabjerg, F. and Mohan, N., "Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump", Sixteenth Annual IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol.2, pp.1267-1273, March 2001
- [7] Chang, C.S., Yang, S.W. and Ho, Y.S., "Simulation and analysis of series voltage restorers (SVR) for voltage sag relief", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.4, pp. 2476-2481, 2000.

- [8] Ramachandaramurthy, V.K., Fitzler, C., Arulampalam, A., Zhan, C., Barnes, M. and Jenkins, N., "Control of a battery supported dynamic voltage restorer", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol.149, No.5, pp. 533-542, 2002.
- [9] Zhan, C., Ramachandaramurthy, V.K., Arulampalam, A., Fitzler, C., Kromlidis, S., Barnes, M. and Jenkins, N., "Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control", IEEE Trans. Industry Applications, Vol.37, No.6, pp. 1855-1863, 2001.
- [10] Choi, S.S., Li, B.H. and Vilathgamuwa, D.M., "Dynamic voltage restoration with minimum energy injection", IEEE Trans. Power Systems, Vol.15, No.1, pp. 51-57, 2000.
- [11] Li, B.H., Choi, S.S. and Vilathgamuwa, D.M., "A new control strategy for energy-saving dynamic voltage restoration", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol.2, pp. 1103-1108, 2000.
- [12] Vilathgamuwa, M., Ranjith Perera, A.A.D. and Choi, S.S., "Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control", IEEE Trans. Power Electronics, Vol.17, No.5, pp. 824-834, 2002.