



سیزدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق ۱۱ و ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۷ - گیلان

جبران کمبود ولتاژهای متقارن و نامتقارن سیستم توزیع توسط DVR با قابلیت بازیابی زاویه فاز ولتاژ

آرش تعویقی^۱ حامد عبدالله زاده^۲ سعید افشارنیا^۱
^۱ دانشکده فنی دانشگاه تهران - ایران
^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: کیفیت برق، کمبود ولتاژ، پرش فاز، DVR، الگوی تخمین حداقل مربعات و روش جبران‌سازی پیش از کمبود

چکیده

امروزه با توجه به گسترش فزاینده بارهای حساس در سیستم توزیع، نارسایی کمبود ولتاژ به یکی از جدی‌ترین مشکلات کیفیت برق تبدیل شده و توجه بسیاری از شرکت‌های توزیع نیرو و مشترکین را به خود اختصاص داده است. از این رو در این مقاله به شناخت این پدیده، منشأ پیدایش و اثرات نامطلوب آن پرداخته شده و بکارگیری DVR به عنوان مؤثرترین گزینه جهت رفع آن معرفی گردیده است.

در ساختار DVR، طراحی سیستم کنترل از اهمیت بسزایی برخوردار است. زیرا در این بخش است که سرعت پاسخ و چگونگی رفع کمبود ولتاژ مشخص می‌گردد. در این تحقیق، سرعت پاسخ سه الگوی تخمین ولتاژ، بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته است؛ که در این بین، الگوی حداقل مربعات به دلیل سرعت پاسخ بالا، به عنوان گزینه‌ای مناسب برگزیده و در سیستم کنترل DVR بکار رفته است. بر اساس الگوی تخمین مزبور، الگوریتم کنترلی مؤثری ارائه گردیده است؛ که بر خلاف روش‌های جبران‌سازی موجود، علاوه بر بازیابی دامنه کمبود ولتاژ، از قابلیت جبران پرش فاز به مقدار پیش از وقوع خطا نیز برخوردار می‌باشد.

در نهایت، نحوه عملکرد و سرعت پاسخ DVR، در جبران کمبود ولتاژهای متقارن و نامتقارن، در یک شبکه توزیع نمونه، با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱. مقدمه

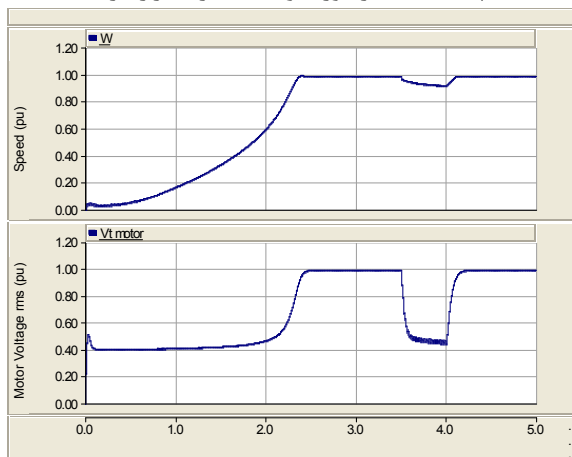
بخش توزیع نیروی برق، به عنوان حلقه اصلی ارتباط زنجیره این صنعت با مشترکین به‌شمار می‌آید. بنابراین مدیریت مصرف و توجه به کیفیت خدمات در همین بخش است؛ که مورد قضاوت مردم قرار می‌گیرد. بدین مفهوم که داشتن توانی با کیفیت مطلوب و عاری از هرگونه اغتشاش، از جمله توقعاتی است؛ که علاوه بر مدت زمان برق‌دار بودن، خصوصاً در محیط رقابت اقتصادی، مطرح می‌گردد. از این رو، بررسی نارسایی‌های کیفیت برق در سالهای اخیر به طور جدی مورد توجه بسیاری از مشترکین توزیع قرار گرفته است.

در بین مشکلات کیفیت برق، کمبود ولتاژ در زمره شایع‌ترین نارسایی‌ها (با حدود ۸۵٪ رخداد) قرار دارد؛ که طبق تعریف استاندارد IEEE-1159-1995 به کاهش ناگهانی مقدار مؤثر ولتاژ به میزان ۱۰٪ تا ۹۰٪ و در مدت زمان بین ۵/۰ سیکل تا ۱ دقیقه اطلاق می‌شود. این پدیده عموماً بر اثر عواملی نظیر: راه‌اندازی موتورهای بزرگ، جریان هجومی ترانسفورماتورها و به ویژه بروز انواع اتصال کوتاه در سیستم توزیع رخ می‌دهد [۱]؛

که از جمله اثرات سوء آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- خاموش شدن لامپ‌های خلأ طی ۹۰٪ کمبود ولتاژ
- ایجاد خطا در کموتاسیون اینورترهای درایوهای قدرت
- افزایش ریپل در منبع تغذیه dc کنترل‌کننده‌های اتوماتیک
- صدور فرمان قطع اشتباه در رله‌های ac و کنتاکتورها
- افزایش تلفات حرارتی در موتورهای القایی

و پروسه‌ای را که باید کنترل نمایند؛ از دست داده و بصورت خودکار از مدار خارج می‌شوند و راه‌اندازی مجدد آنها، زمان طولانی‌تری را در پی خواهد داشت. از آنجایی که صنایع به جهت دستیابی به تولید بیشتر و باقی ماندن در عرصه رقابت، از تجهیزات اتوماتیک بیشتری نسبت به گذشته استفاده می‌نمایند؛ بنابراین اثرات زیان‌بار کمبود ولتاژ، در حال حاضر نسبت به چند دهه اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.



شکل (۳) - نمودار سرعت و مقدار مؤثر ولتاژ موتور در هنگام بروز اتصال کوتاه تک فاز در فیدر بار

همچنین در صورتی که بر اثر کمبود ولتاژ حاصله، علاوه بر کاهش مقدار مؤثر ولتاژ، پرش فاز در زاویه ولتاژ شبکه رخ دهد؛ مشکلات دو چندان خواهد شد. بروز این نارسایی بر عملکرد تجهیزاتی همچون یکسوسازها، که از زاویه فاز ولتاژ شبکه برای کنترل زاویه آتش خود استفاده می‌نمایند؛ تأثیر نامطلوبی بر جای می‌گذارد [۱]. میزان پرش فاز به عواملی همچون ساختار سیستم توزیع (نسبت X/R) و نوع اتصال کوتاه وابسته است.

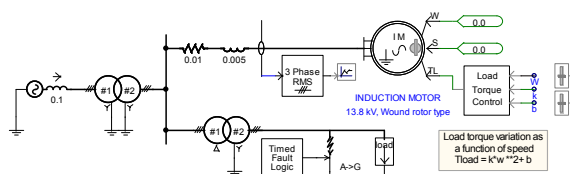
۲. روش‌های جبران کمبود ولتاژ

متداول‌ترین روش‌هایی که به منظور جبران کمبود ولتاژ تاکنون مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ عبارتند از:

- استفاده از کابل‌های زیرزمینی به جای کابل‌های هوایی
- افزایش سطح عایقی تجهیزات
- تغذیه بارهای حساس از دو یا چند نقطه
- نصب رآکتورهای محدود کننده جریان خطا
- ایزوله کردن بارهای حساس با استفاده از خطوط مجزا
- کاهش زمان کمبود با استفاده از تجهیزات حفاظتی سریع
- نصب ادوات جبران‌کننده کمبود ولتاژ

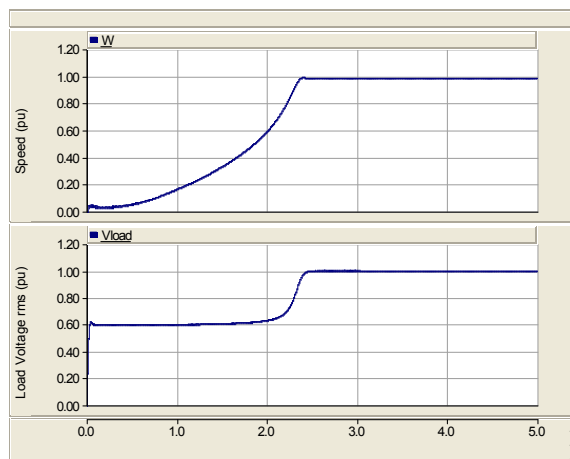
شش گزینه نخست به مدیریت شبکه، بکارگیری نیروی انسانی، صرف هزینه‌های تعمیر و نگهداری مداوم نیازمند است و از

به طوری که مطرح گردید؛ موتورهای القایی از جمله تجهیزاتی هستند؛ که از یک سو به بروز این پدیده حساسند و از سوی دیگر خود منشأ پیدایش این نارسایی می‌باشند. از این رو، جهت آشکار شدن اثرات متقابل مزبور، یک موتور القایی سه فاز از نوع روتور سیم‌پیچی شده با توان نامی 500 kW و امیدانس‌های یکسان به همراه یک بار 500 kW و 1 kV در یک سیستم توزیع $13/8 \text{ kV}$ مطابق شکل (۱)، با قدرت اتصال کوتاه 7 MVA شبیه‌سازی شده است.



شکل (۱) - بلوک دیاگرام موتور القایی در شبکه توزیع نمونه

در شکل (۲)، نمودار سرعت موتور از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به حالت پایدار و نیز مقدار مؤثر ولتاژ بار، نشان داده شده است.



شکل (۲) - نمودار سرعت موتور و مقدار مؤثر ولتاژ بار در هنگام راه‌اندازی موتور

به‌گونه‌ای که ملاحظه می‌گردد؛ کمبود ولتاژ حاصل از راه‌اندازی موتور، باعث ایجاد حدوداً 40% کمبود ولتاژ در مدت زمان $2/45$ ثانیه در فیدر بار گردیده است. از سوی دیگر، چنانچه پس از رسیدن موتور به حالت پایدار، در لحظه $t=3/5 \text{ s}$ یک اتصال کوتاه تک‌فاز در فیدر بار رخ دهد؛ در این صورت کمبود ولتاژی به میزان حدوداً 55% و در مدت زمان $0/5$ ثانیه، مطابق شکل (۳)، در پایانه موتور ایجاد خواهد شد. کاهش دامنه ولتاژ بیش از 75% مقدار نامی، موجب آسیب دیدن موتور گردیده که این امر نهایتاً به توقف آن می‌انجامد.

بارهای حساسی همچون کامپیوترها و محرکه‌های کنترل دور نیز، در اثر 10 تا 15 درصد کمبود ولتاژ با تداوم 16 ms ، حافظه

بارهای حساس، مطابق شکل(۴)، بصورت سه فاز متقارن، با دامنه و فاز بازیابی شده به مقدار پیش از کمبود، حفظ شود. به دلیل اهمیت این بخش، در ادامه به بررسی سیستم کنترل پرداخته می‌شود.

۳. بررسی الگوهای تخمین ولتاژ

در اکثر مواردی که امروزه مشاهده می‌شود؛ حدود ۴۰٪ مواقع، مدت زمان کاهش ولتاژ، به اندازه‌ای است که از میزان تحمل قابل قبول ارائه شده توسط استاندارد IEEE_446 بیشتر است؛ که این امر، آسیب دیدگی و توقف تجهیزات حساس به مدت زمان کمبود ولتاژ را در پی خواهد داشت. بنابراین سرعت پاسخ DVR، نقش مؤثری در حفاظت از بار مشترکین توزیع بر عهده دارد؛ بگونه‌ای که اگر جبران‌ساز، علی‌رغم تزریق مناسب مقدار ولتاژ مورد نظر، از سرعت کافی برخوردار نباشد؛ قادر نخواهد بود انرژی مورد نیاز بار حساس به کمبود ولتاژ را طی دوره جبران‌سازی، تأمین نماید؛ که این مهم تنها با انتخاب الگوی تخمین ولتاژ مناسب، میسر می‌گردد.

به طور کلی، مهمترین الگوهایی که برای تخمین دامنه و فاز ولتاژ شناخته شده‌اند؛ عبارتند از: تبدیل فوریه سریع^۲، شبکه عصبی خطی تطبیق‌پذیر^۳ و روش حداقل مربعات^۴ [۷و۶]. دو روش نخست به دلیل داشتن تأخیر زیاد به ترتیب به میزان یک سیکل و نیم سیکل، قادر به تخمین سریع نبوده و عملاً بکارگیری آنها در سیستم کنترل DVR پیشنهاد نمی‌گردد. در مقابل، الگوی حداقل مربعات علاوه بر سرعت پاسخ مطلوب، از دقت خوبی نیز برخوردار می‌باشد؛ از این رو در ادامه، به تحلیل و بررسی این روش، پرداخته شده است. چنانچه ولتاژ نمونه‌برداری شده شبکه به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$V(t_i) = V_m \sin(\omega_0 t_i + \varphi) \quad (1)$$

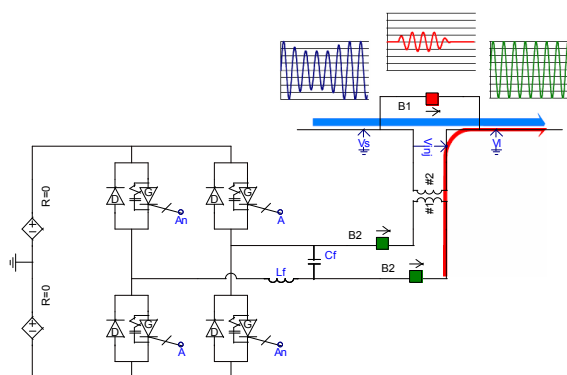
که در آن $V(t_i)$ ، i امین نمونه از ولتاژ شبکه و V_m و φ ، دامنه و فاز آن و t_i طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$t_i = i \cdot \Delta t, \quad \Delta t = 1 / f_s \quad (2)$$

در رابطه (۲)، Δt و f_s به ترتیب، زمان و فرکانس نمونه‌برداری می‌باشند. در این صورت، با بسط مثلثاتی عبارت رابطه (۱) و به ازای تعداد مشخصی از نمونه‌ها (طول پنجره تخمین) می‌توان آخرین n از نمونه ولتاژ شبکه را با استفاده از روابط ریاضی و نوشتن نتایج به شکل ماتریسی بصورت زیر بیان نمود:

سوی دیگر منحصراً به جبران کمبود ولتاژ اختصاص داشته و امکان توسعه در آنها وجود ندارد. در مقابل، همزمان با ظهور موضوع کیفیت توان توسط Hingorani از سال ۱۹۸۸، بکارگیری بهسازهای پیشرفته‌ای در شبکه‌های توزیع موسوم به ادوات Custom Power با فلسفه بهبود کیفیت برق و مرتبط با نیاز مشترکین، پیشنهاد شده است. تجهیزات مزبور، بر اساس نحوه اتصال به شبکه به سه دسته عمده DVR (سری)، DSTATCOM (موازی) و UPQC (سری- موازی) تقسیم می‌شوند؛ که در این بین بازیاب دینامیکی ولتاژ DVR^۱ به عنوان مؤثرترین تجهیز، از لحاظ نحوه عملکرد و ملاحظات اقتصادی، برای جبران کمبود ولتاژ شناخته شده است [۳و۲]. شکل(۴)، ساختار DVR در هر فاز را نشان می‌دهد [۴]؛ که از ۶ بخش اصلی به شرح زیر تشکیل یافته است:

- ذخیره‌ساز انرژی (مجموعه باتری)
- اینورتر منبع ولتاژ سه فاز
- فیلتر هارمونیک غیرفعال (C_f و L_f)
- ترانسفورماتورهای تزریق
- کلیدهای حفاظتی (B_1 و B_2)
- بخش تخمین ولتاژ و سیستم کنترل



شکل(۴) - دیاگرام تک خطی DVR متصل به شبکه

اینورتر منبع ولتاژ سه فازی که در ساختمان DVR بکار رفته است؛ متشکل از سه اینورتر تک‌فاز دو ساقه (H-Bridge)، مطابق شکل(۴)، می‌باشد؛ تا بدین ترتیب امکان جبران‌سازی کمبود ولتاژهای نامتقارن نیز وجود داشته باشد [۵]. در بین اجزای مطرح شده، انتخاب الگوی تخمین ولتاژ، سرعت پاسخ‌دهی و طراحی سیستم کنترل، نحوه جبران کمبود ولتاژ را مشخص می‌نماید. به طوری که، DVR با تزریق سه ولتاژ دینامیکی، دامنه و فاز ولتاژ شبکه را به گونه‌ای کنترل می‌نماید؛ که در صورت بروز کمبود در ولتاژ تغذیه، ولتاژ دو سر

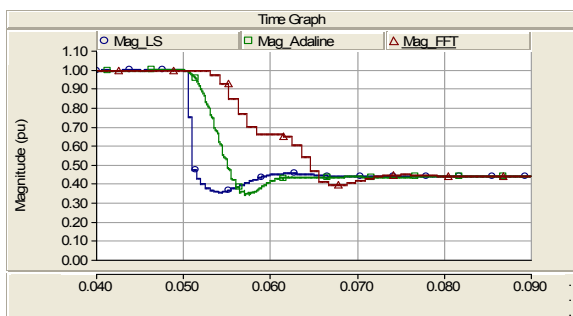
² Fast Fourier Transform

³ Adaptive Linear Combiner

⁴ Least Squares

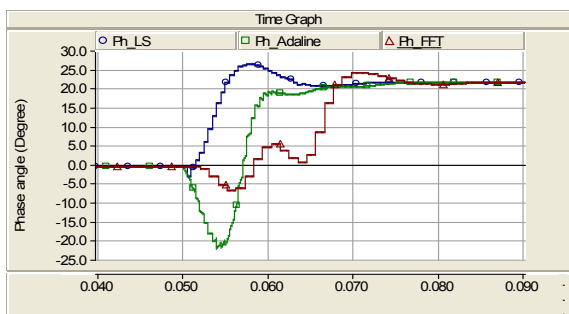
¹ Dynamic Voltage Restorer

و LS با ۳ نمونه و فرکانس نمونه برداری ۲ kHz تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند.



شکل (۵) - مقایسه تخمین دامنه کمبود ولتاژ

مطابق شکل فوق، تخمین دامنه کمبود ولتاژ ۵۶٪ پریونیت به کمک الگوی LS، با سرعت مطلوبی در حدود ۲ ms صورت گرفته که این امر در روش Adaline به ۱۰ ms و در FFT به ۲۰ ms تأخیر منتهی می‌گردد.



شکل (۶) - مقایسه تخمین پرش زاویه فاز ولتاژ

به گونه‌ای که در شکل (۶) نیز ملاحظه می‌گردد؛ تأخیر در تخمین پرش فاز ۲۲ درجه‌ای بر طبق الگوی LS تنها به حدود ۵ ms محدود می‌گردد؛ که در مقایسه با تأخیر دو روش دیگر، سرعت پاسخ بسیار مناسبی است. بدین ترتیب، می‌توان الگوی LS را از حیث برخورداری از دقت و سرعت پاسخ مطلوب به عنوان گزینه‌ای مناسب در بخش تخمین سیستم کنترل DVR برگزید.

۴. روش جبران سازی پیش از کمبود^۱

یکی از متداول ترین روش‌های جبران انواع کمبود ولتاژ، الگوی قاب مرجع سنکرون است [۸]. اساس این روش بر ردیابی فاز ولتاژ به کمک PLL و ارجاع مقادیر لحظه‌ای سه فاز abc به کمیات دو فاز گردان dq استوار است. روش مزبور، از دقت و سرعت مناسبی در جبران کمبود ولتاژ متقارن برخوردار است؛ اما در مقابل، چنانچه کمبود ولتاژ نامتقارن باشد؛ با توجه به

$$[V_{t_i}]_{n \times 1} = [A]_{n \times 2} \times [\hat{V}(t_i)]_{2 \times 1} \quad (3)$$

که در آن مؤلفه‌های تخمینی و ماتریس A عبارتند از:

$$[\hat{V}(t_i)] = \begin{bmatrix} \hat{V}_X(t_i) \\ \hat{V}_Y(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\varphi) \\ V_m \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\sin(1 \times \Delta t) & \cos(1 \times \Delta t) \\ -\sin(2 \times \Delta t) & \cos(2 \times \Delta t) \\ \dots & \dots \\ -\sin(n \times \Delta t) & \cos(n \times \Delta t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

با تعریف ماتریس شبه معکوس P به صورت زیر، معادله (۳) قابل حل می‌باشد.

$$[P]_{2 \times n} = ([A^T]_{2 \times n} \times [A]_{n \times 2})^{-1} \times [A^T]_{2 \times n} \quad (6)$$

بدین ترتیب ولتاژ تخمین زده شده بر مبنای روش حداقل مربعات، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$[\hat{V}(t_i)]_{2 \times 1} = [P]_{2 \times n} \times [V_{t_i}]_{n \times 1} \quad (7)$$

در نهایت، با توجه به رابطه (۷)، دامنه و زاویه تخمینی، بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$\hat{V}_m = \sqrt{\hat{V}_X(t_i)^2 + \hat{V}_Y(t_i)^2}, \quad \hat{\varphi} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{V}_Y(t_i)}{\hat{V}_X(t_i)} \right) \quad (8)$$

با بکارگیری روش مزبور می‌توان تخمینی دقیق از دامنه و فاز در شرایط سینوسی شبکه در دست داشت. بر اساس معیار نایکوئیست، نرخ نمونه برداری (f_s)، حداقل دو برابر فرکانس آخرین مرتبه هارمونیک ولتاژ سیستم در نظر گرفته می‌شود. افزایش فرکانس نمونه برداری منجر به افزایش سرعت تخمین می‌گردد؛ که در مقابل، فراجش نیز در لحظات اولیه تخمین، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، انتخاب طول پنجره بزرگتر (افزایش تعداد نمونه‌ها) بر دقت تخمین می‌افزاید؛ که در مقابل، باعث کندی سرعت پاسخ می‌شود. بدین ترتیب همواره مصالحه‌ای مابین انتخاب نرخ نمونه برداری بهینه و نیز طول پنجره تخمین وجود دارد؛ اما به طور کلی با انتخاب طول پنجره برابر ۰/۱ نمونه‌های هر سیکل و نیز فرکانس نمونه برداری ۲ kHz می‌توان تخمینی مناسب از ولتاژ در اختیار داشت.

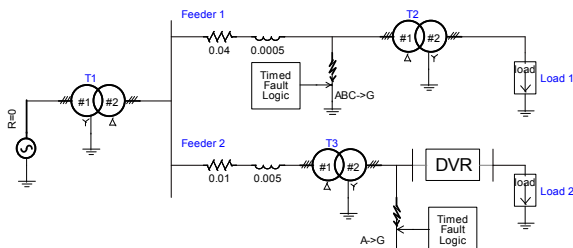
به منظور بررسی دقیق تر، مطالب فوق، در شکل‌های (۵) و (۶)، نتایج تخمین دامنه کمبود ولتاژ و پرش زاویه فاز حاصله در شبکه توزیع نمونه شکل (۹)، بر طبق الگوهای Adaline، FFT،

¹ Pre-sag Compensation Method

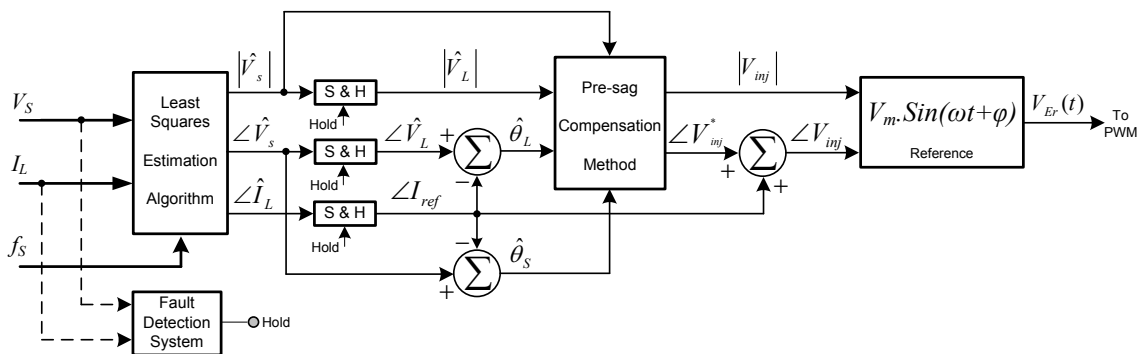
کمیات پیش از کمبود که مبین مقادیر مرجع می‌باشند؛ در واقع همان مقادیر تخمین زده شده‌ای هستند؛ که با استفاده از ثبات‌ها (S&H)، در مقدار پیش از کمبود ذخیره می‌گردند. در این صورت، چنانچه در نظر گرفتن آخرین تغییرات بار نیز مد نظر باشد؛ فرمان ثبت داده‌ها یک سیکل قبل از وقوع کمبود، توسط سیستم تشخیص خطا، صادر می‌گردد؛ تا بدین ترتیب، تأخیر این بخش، سبب ذخیره کمیات در مقدار پس از کمبود نشود. اینک با در اختیار داشتن مقادیر پیش از کمبود، $(\theta_L, |V_L|)$ ، و نیز مقادیر پس از آن، $(\theta_S, |V_S|)$ ، دامنه و زاویه فاز ولتاژ تزریقی، طبق روابط (۹) و (۱۰)، در بلوک جبران‌سازی تحقق می‌یابند. شایان ذکر است؛ از آنجایی که فاز جریان بار ثبت شده در مقدار پیش از کمبود به عنوان مرجع فاز در نظر گرفته شده بود؛ از این رو لازم است؛ مقدار مزبور به زاویه فاز ولتاژ تزریقی نیز اضافه گردد. در نهایت، با استفاده از یک موج سینوسی با دامنه و فاز ولتاژ تزریقی و نیز با فرکانس شبکه، سیگنال لحظه‌ای خطای مورد نظر بدست آمده و به مدولاتور SPWM جهت ساختن پالس‌های کلیدزنی اینورتر اعمال می‌گردد [۱۱].

۵. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه با پارامترهای مندرج در جدول ضمیمه، در شکل (۹) نشان داده شده و شبیه‌سازی آن در محیط PSCAD/EMTDC انجام شده است [۱۱].

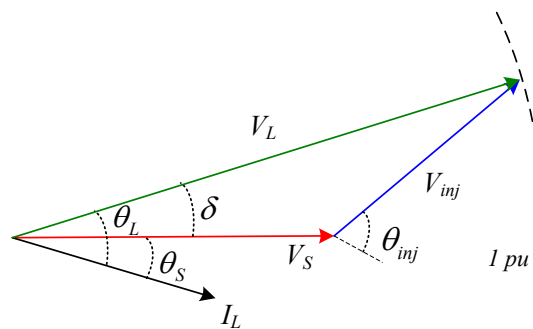


شکل (۹) - دیاگرام تک خطی شبکه توزیع نمونه



شکل (۸) - سیستم کنترل روش جبران‌سازی پیش از کمبود در هر فاز

حضور فیلترهای پایین‌گذر در سیستم کنترل، به منظور حذف مؤلفه‌های نوسانی، کاهش محسوسی در سرعت پاسخ DVR، پدید می‌آید. از سوی دیگر، در صورتی که بر اثر بروز کمبود ولتاژ، پرش فاز در زاویه ولتاژ شبکه پدید آید؛ سیستم کنترل مزبور، قادر به جبران آن نمی‌باشد. برای این منظور، در این مقاله، سیستم کنترلی موسوم به الگوی جبران‌سازی پیش از کمبود، ارائه گردیده که علاوه بر جبران دامنه کمبود، از قابلیت بازیابی پرش زاویه فاز ولتاژ بطور دقیق به مقدار پیش از رخداد کمبود نیز برخوردار است. در شکل (۷)، دیاگرام برداری این الگو نشان داده شده است [۹ و ۱۰].



شکل (۷) - دیاگرام برداری روش پیش از کمبود

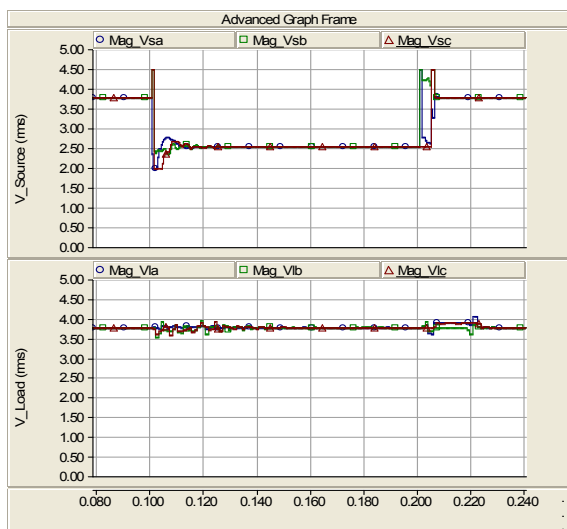
با توجه به دیاگرام برداری فوق، اندازه و فاز ولتاژ تزریقی DVR به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$|V_{inj}| = \sqrt{V_L^2 + V_S^2 - 2V_L V_S \cos(\theta_L - \theta_S)} \quad (9)$$

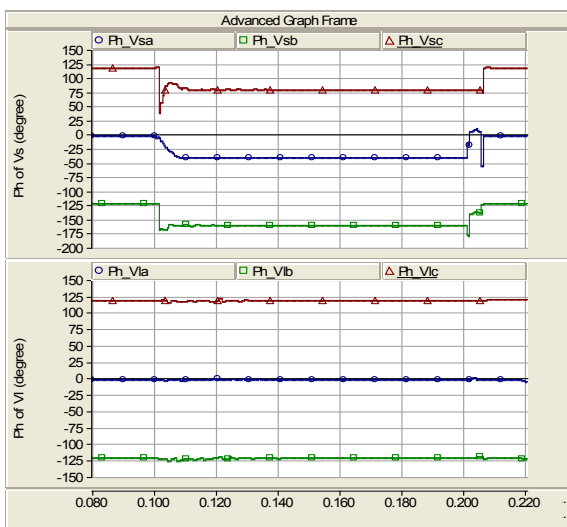
$$\angle V_{inj} = \theta_{inj} = \tan^{-1} \left(\frac{V_L \sin \theta_L - V_S \sin \theta_S}{V_L \cos \theta_L - V_S \cos \theta_S} \right) \quad (10)$$

اینک، با توجه به روابط (۹) و (۱۰) و تخمین دامنه و فاز ولتاژ شبکه (V_S) و زاویه فاز جریان بار (I_L)، بصورت Online به کمک الگوی حداقل مربعات، سیستم کنترل پیشنهادی DVR در هر فاز، بصورت شکل (۸)، تحقق می‌یابد.

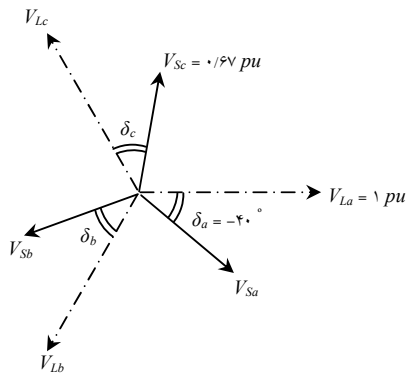
نتایج حاصل از آن را می‌توان به صورت دیاگرام برداری شکل (۱۳) نمایش داد.



شکل (۱۱) - مقادیر مؤثر ولتاژ شبکه و ولتاژ بار جبران شده



شکل (۱۲) - مقادیر فاز ولتاژ شبکه و فاز ولتاژ بار جبران شده



شکل (۱۳) - دیاگرام برداری کمبود ولتاژ متقارن

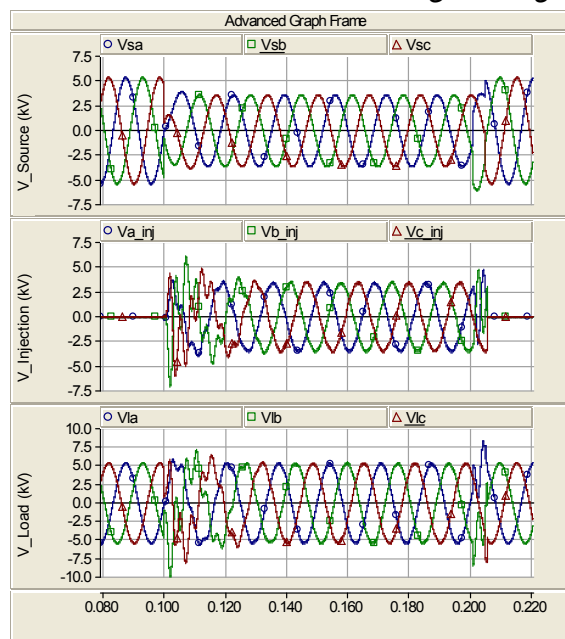
بر طبق دیاگرام برداری فوق، در کمبود ولتاژ متقارن، دامنه ولتاژ فازها به یک میزان کاهش یافته و پرش فاز ایجاد شده نیز

همانطور که در شکل (۹) ملاحظه می‌گردد؛ در شبکه مورد مطالعه، پست فوق توزیع ۶۳ kV از طریق ترانسفورماتور T_1 ، دو فیدر توزیع ۲۰ kV را تغذیه می‌نماید. فیدهای ۱ و ۲ نیز از طریق ترانسفورماتورهای T_2 و T_3 ، انرژی مورد نیاز بارهای ۱ و ۲ را فراهم می‌آورند.

کمبود ولتاژ در شینه بار ۲ با استفاده از اتصال کوتاههایی در لحظه $t = 0/1s$ و با تداوم ۱۰۰ ms، در نظر گرفته شده است. اینک با فرض حساس بودن بار ۲ و به منظور حفاظت از آن، یک DVR، مطابق شکل (۴)، متشکل از اینورتری با کلیدهای GTO و فرکانس کلیدزنی ۳ kHz، به فیدر مزبور متصل شده است. شایان ذکر است که محل نصب DVR عمدتاً در سمت فشار قوی فیدر توزیع پیشنهاد می‌گردد؛ تا در این صورت امکان حفاظت از مجموعه‌ای از بارهای حساس، وجود داشته باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم کنترل و همچنین دیاگرام برداری کمبود ولتاژ حاصله در دو حالت متقارن و نامتقارن در بخش‌های ۵-۱ و ۵-۲ آورده شده است.

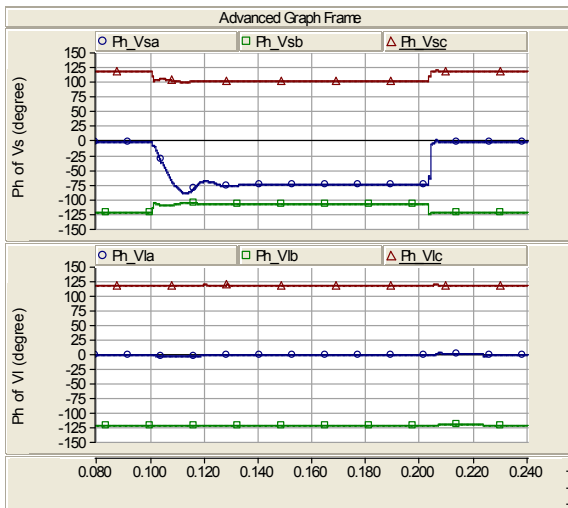
۵-۱. کمبود ولتاژ متقارن

بر اثر وقوع اتصال کوتاه سه‌فاز در فیدر ۱، مطابق شکل (۹)، کمبود ولتاژ متقارنی در شینه بار ۲ رخ می‌دهد. مقادیر لحظه‌ای ولتاژ شبکه، ولتاژ تزریقی DVR و ولتاژ بار جبران شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



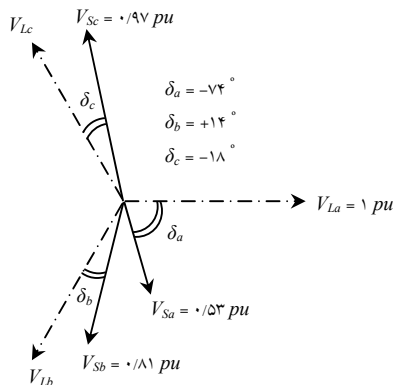
شکل (۱۰) - ولتاژ شبکه، ولتاژ تزریقی و ولتاژ بار جبران شده

به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد سیستم کنترل در بازیابی دامنه و فاز، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب، مقادیر مؤثر و زاویه ولتاژ شبکه و ولتاژ بار جبران شده آورده شده است؛ که



شکل (۱۶) - مقادیر فاز ولتاژ شبکه و فاز ولتاژ بار جبران شده

دیگرام برداری نتایج بدست آمده از شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نیز مطابق شکل (۱۷) است.



شکل (۱۷) - دیگرام برداری کمبود ولتاژ نامتقارن

مطابق با دیگرام برداری فوق، در کمبود ولتاژ نامتقارن، علاوه بر کاهش غیریکنواخت دامنه ولتاژ فازها، پرش فازهای ایجاد شده نیز متفاوت و به صورت پیش‌فاز و پس‌فاز می‌باشد؛ که در این حالت نیز نتایج شبیه‌سازی، گویای عملکرد مناسب سیستم کنترل در جبران کمبود ولتاژ حاصل از وقوع نامتقارن‌ترین و شایع‌ترین اتصال کوتاه در شبکه توزیع نمونه است.

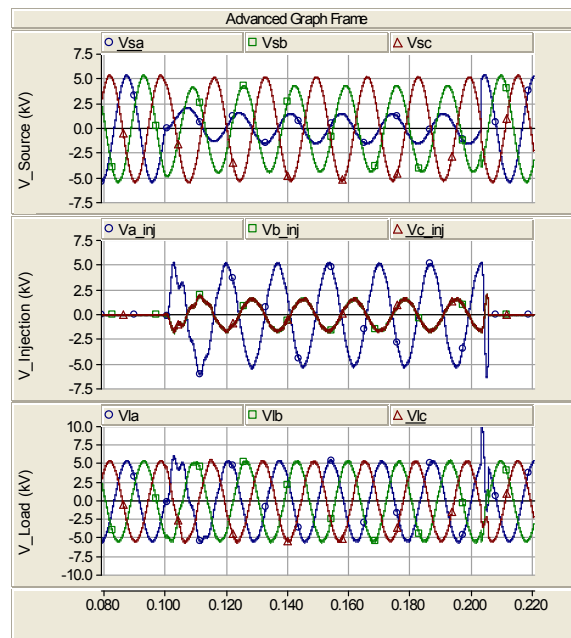
۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، کمبود ولتاژ به عنوان یکی از مشکلات کیفیت برق شبکه‌های توزیع مطرح و چگونگی پیدایش و اثرات نامطلوب آن مورد بحث قرار گرفت. در ادامه، چگونگی ایجاد کمبود ولتاژ توسط موتورهای القایی و همچنین تأثیرپذیری آنها از این نارسایی، مورد بررسی قرار گرفت.

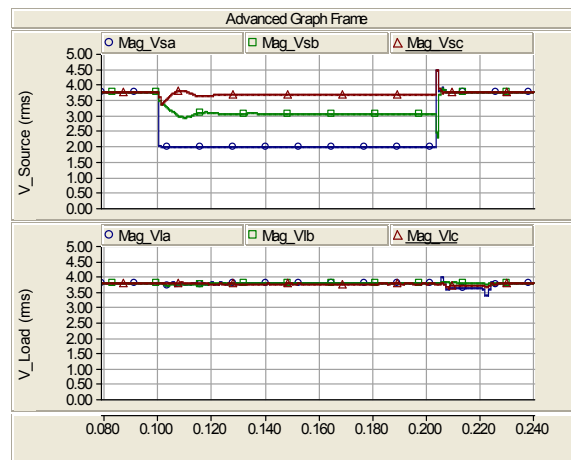
یکسان می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، قابلیت و سرعت پاسخ سیستم کنترل را در جبران کمبود ولتاژ حاصل از وقوع شدیدترین و نادرترین اتصال کوتاه در سیستم، مشخص می‌سازد.

۵-۲. کمبود ولتاژ نامتقارن

شبیه‌سازی این حالت نیز با در نظر گرفتن اتصال کوتاه تک فاز به زمین (فاز a) در فیدر ۲ شبکه توزیع نمونه در نظر گرفته شده است؛ که بر این اساس کمبود ولتاژ نامتقارنی در شینه بار ۲ رخ می‌دهد. در این حالت نیز، شکل موج‌های لحظه‌ای، مقادیر مؤثر و زاویه فاز ولتاژ، به ترتیب در شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶)، آورده شده است.



شکل (۱۴) - ولتاژ شبکه، ولتاژ تزریقی و ولتاژ بار جبران شده



شکل (۱۵) - مقادیر مؤثر ولتاژ شبکه و ولتاژ بار جبران شده

- [3] Aalborg University “ Employment and Control of CUPS in The Distribution Network ” 2000-2001.
- [4] J. G. Nielsen, and F. Blaabjerg, “ A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers ” , IEEE Trans. on industry applications, Vol. 41, No. 5, pp. 1272-80, Sep./Oct. 2005.
- [5] B. Wang, G. Venkataramanan, and M. Illindala, “ Operation and Control of a Dynamic Voltage Restorer Using Transformer Coupled H-Bridge Converters ” , IEEE Trans. on power electronics, Vol. 21, No. 4, pp. 1053-61, July 2006.
- [6] M. I. Marei, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, “ A Processing Unit for Symmetrical Components and Harmonics Estimation Based on a New Adaptive Linear Combiner Structure ” , IEEE Trans. on power delivery, Vol. 19, No. 3, pp. 1245-52, July 2004.
- [7] X. Jiang, J. King, A. Emadi “ A Power Harmonics Detection Approach Based on Least Squares Energy Minimization Principle ” 30th Annual IEEE Conference, Nov. 2004.
- [8] H. J. Jung, I. Y. Suh, B. S. Kim, R. Y. Kim, S. Y. Choi, and J. H. Song, “A study on DVR control for unbalanced voltage compensation,” 17th Annual IEEE Conference on applied power Electronics, APEC, Vol. 2, pp. 1068-73, 2002.
- [9] A. M. Munoz, D. Oterino, M. Gonzalez, and F. A. Olivenicia “ Study of sag compensation with DVR ” Mediterranean IEEE Electrotechnical Conference, MELECON, pp. 990-993, May 2006.
- [10] J. G. Nielsen, F. Blaabjerg, and N. Mohan, “ Control Strategies for Dynamic Voltage Restorer Compensating Voltage sags with Phase Jump ” 16th Annual IEEE Conference, APEC, Vol. 2, pp. 1267-73, 2001.
- [11] H. Olimpo Anaya-Lara, and E. Acha, “ Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC ” , IEEE Trans. on power delivery, Vol. 17, No. 1, pp. 266-272, Jan. 2002.

در بین گزینه‌های موجود جهت رفع کمبود ولتاژ، DVR به عنوان مؤثرترین گزینه و در بین اجزای تشکیل دهنده آن، طراحی سیستم کنترل به عنوان مهمترین بخش معرفی گردید. به گونه‌ای که مطرح شد؛ در بخش تخمین سیستم کنترل با بهره‌گیری از الگوی حداقل مربعات، سرعت پاسخ جبران‌ساز تنها به 5 ms محدود می‌گردد؛ که خود از جمله نقاط مثبت این طراحی در حفاظت از بارهای حساس به مدت زمان کمبود ولتاژ شمرده می‌شود. از سوی دیگر، چنانچه مشخص گردید؛ الگوی جبران‌سازی پیش از کمبود از هماهنگی خوبی با بخش تخمین برخوردار بوده و علاوه بر امکان بازیابی دامنه ولتاژ شبکه، از قابلیت جبران پرش فاز به مقدار پیش از کمبود نیز برخوردار می‌باشد؛ که اهمیت این امر در حفاظت از بارهای حساس به پرش زاویه فاز، نمایان می‌گردد. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نیز، طراحی بهینه سیستم کنترل را در جبران دو حالت کمبود ولتاژ متقارن و نامتقارن، آشکار ساخت.

۷. جدول ضمیمه

مشخصات ترانسفورماتورها	مقادیر
T ₁ ترانسفورماتور	$U_k = 1\%$, 5 (MVA), 20 Δ (kV), 3 Y
T ₂ ترانسفورماتور	$U_k = 5\%$, 50 (kVA), 4 Y / 0.4 Δ
T ₃ ترانسفورماتور	$U_k = 3\%$, 1 (MVA), 6 Y / 0.6 Δ
پارامترهای DVR	مقادیر
ولتاژ لینک dc	2 × 4/5 (kV)
ترانسفورماتور تزریق	$X = 2\%$, 360 (kVA), 6 / 6 (kV)
فیلتر هارمونیک	$L = 0.2$ (mH) و $C = 3$ (mF)
مشخصات بار	مقادیر
بار ۱	PF = 1 و 8 (kVA)
بار ۲	PF = 0.9 (Lag) و 0.8 (MVA)

۸. مراجع

- [1] M. Bollen. “ Understanding Power Quality Problems, Voltage sags and interruptions ” IEEE press, 1999.
- [2] Y. W. Li, F. Blaabjerg, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, “ Design and Comparison of High Performance Stationary-Frame Controllers for DVR Implementation ” , IEEE Trans on power electronics, Vol. 22, No. 2, pp. 602-612, March 2007.