

PSC 2007

98-F-PQA-742

طراحی سیستم کنترل نوین DVR به منظور جبران سازی انواع کمبود ولتاژ در شبکه توزیع بر اساس روش پیش از خطا

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

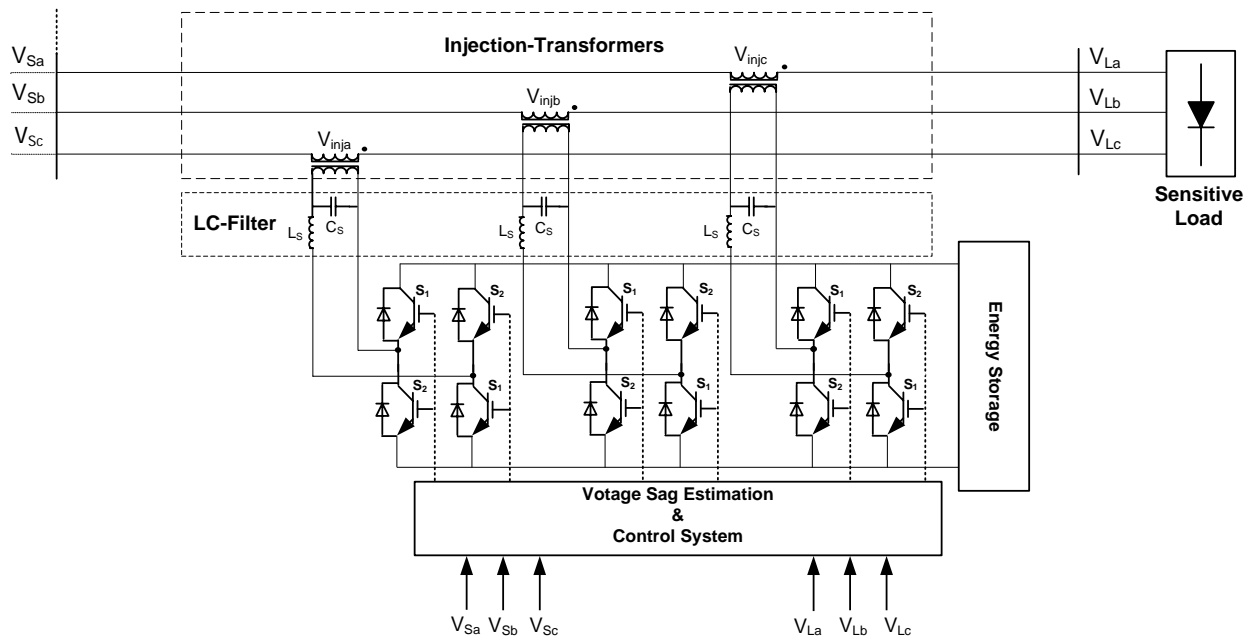
واژه های کلیدی: کمبود ولتاژ، DVR، استراتژی جبران پیش از خطا، الگوی حداقل مربعات، استخراج مؤلفه توالی مثبت

چکیده

در بین روش های متداول جبران کمبود ولتاژ توسط DVR، جبران پیش از خطا، روشی مؤثر و سودمند به شمار می آید؛ که علاوه بر جبران دامنه ولتاژ، از قابلیت بازیابی زاویه ولتاژ هر فاز به مقدار پیش از وقوع خطا نیز برخوردار است. اهمیت این امر در حفاظت از بارهای حساس به پرش زاویه فاز نمایان می گردد؛ که سایر روش ها قادر به جبران این مهم نمی باشند. در این مقاله برای نخستین بار الگوی حداقل مربعات به منظور تخمین ولتاژ در سیستم کنترل DVR معرفی شده است. بر اساس این الگو، سیستم کنترل نوینی ارائه گردیده است که قادر به جبران انواع کمبود ولتاژ به روش پیش از خطا بوده و نسبت به سایر روش های مرسوم نظیر قاب مرجع سنکرون (تبدیل d-q) از سرعت و دقت نسبی بالاتری برخوردار است. عملکرد سیستم کنترل مزبور با استفاده از نرم افزار Matlab/Simulink در شرایط سینوسی شبکه، شبیه سازی و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۱. مقدمه

امروزه با گسترش بارهای حساس در شبکه، توجه به مشکلات کیفیت توان، بیش از پیش آشکار گردیده است. بر اساس گزارش های متعدد منتشر شده، کمبود ولتاژ یکی از شایع ترین مشکلات شبکه های توزیع به شمار می رود؛ که به تعداد دفعات زیاد (تقریباً ۸۵٪) رخ می دهد [۱] و قطع بارهای حساس به کمبود ولتاژ را به همراه دارد. کمبود ولتاژ طبق 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 گفته می شود و بر اثر عواملی چون اتصال کوتاهها، راه اندازی موتورهای بزرگ و جریان هجومی در ترانسفورماتورها بوجود می آید. این عوامل علاوه بر کاهش مقدار مؤثر ولتاژ منجر به پرش زاویه فاز نیز می گردند. مقدار پرش فاز ایجاد شده به ساختار شبکه (نسبت X/R) و نوع اتصال کوتاه وابسته است. این پدیده سبب عملکرد نادرست تجهیزاتی چون یکسوسازها می گردد که از زاویه فاز ولتاژ شبکه برای کنترل زاویه آتش استفاده می نمایند [۲].



شکل (۱): ساختار و عملکرد DVR در جبران کمبود ولتاژ بار حساس شبکه

ولتاژ کنترل شده (از لحاظ دامنه و فاز) بصورت سری به شبکه
(V_{inja} , V_{injb} , V_{injc})، قادر به جبران کمبود ولتاژ خواهد بود.

تحقیقات پیشین انجام شده در زمینه استراتژی جبران‌سازی
پیش از خطا بر مبنای روش مرجع سنکرون (تبدیل d-q) و
ردیابی زاویه فاز استوار است. با استفاده از این روش کمبود
ولتاژ متقارن با سرعت و دقت مناسب جبران می‌گردد [۴]؛ اما
در مقابل، جبران‌سازی کمبود ولتاژهای نامتقارن مستلزم
بکارگیری فیلترهای پایین‌گذر برای استخراج مؤلفه مثبت ولتاژ
است [۵]. در صورتی که عدم تقارن در کمبود ولتاژ، قابل توجه
باشد؛ استفاده از فیلترها با مراتب بالاتر، تأخیر قابل ملاحظه‌ای
در زمان پاسخ‌دهی DVR ایجاد می‌نماید. از سوی دیگر،
عملکرد روش مرجع سنکرون بر اساس استفاده از حلقه قفل
شده فاز (PLL) می‌باشد؛ که تمامی ساختارهای ارائه شده
برای PLL قادر به ردیابی دقیق و سریع فاز توالی مثبت در
شرایط نامتقارن نمی‌باشد [۶] و در عمل تنظیم پارامترهای آن
مشکل‌ساز است [۷].

در این مقاله برای نخستین بار، تخمین ولتاژ به روش حداقل
مربعات در DVR معرفی شده است. بر مبنای روش مزبور،
سیستم کنترل نوینی ارائه گردیده است؛ که با حذف فیلتر پایین
گذر و PLL در ساختار آن، با بهبود سرعت پاسخ، قادر به
جبران انواع کمبود ولتاژ به روش پیش از خطا می‌باشد.

ادوات Custom Power شاخص‌ترین جبران‌سازهای
مشکلات کیفیت توان در شبکه توزیع به شمار می‌روند. در بین
این تجهیزات بازیاب دینامیکی ولتاژ DVR¹ مؤثرترین تجهیز
(از لحاظ نحوه عملکرد و ملاحظات اقتصادی) برای جبران
کمبود ولتاژ شناخته شده است. شکل (۱) ساختار و عملکرد
DVR را در جبران کمبود ولتاژ بار حساس، نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۱) ملاحظه می‌گردد؛ DVR از ۵ بخش
اصلی به شرح زیر تشکیل شده است:

- ذخیره‌ساز انرژی
- اینورتر منبع ولتاژ
- فیلتر غیر فعال
- ترانسفورماتورهای تزریقی
- سیستم تخمین (ردیابی) ولتاژ و کنترل

انتخاب الگوی تخمین ولتاژ و طراحی سیستم کنترل DVR،
سرعت پاسخ‌دهی، نحوه عملکرد و نوع جبران‌سازی کمبود
ولتاژ را مشخص می‌سازد. بدین ترتیب DVR با تزریق سه

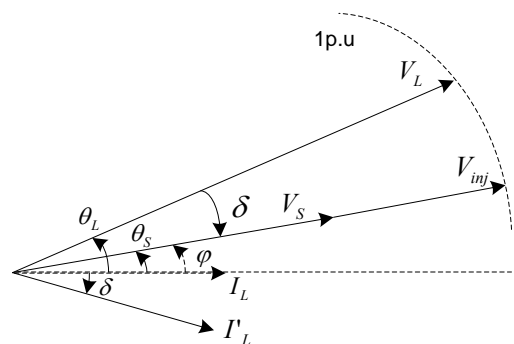
¹ Dynamic Voltage Restorer

۲. روش‌های تزریق ولتاژ با DVR

جبران‌سازی کمبود ولتاژ توسط DVR به عوامل محدود کننده‌ای چون ظرفیت نامی DVR، شرایط مختلف بار و انواع کمبود ولتاژ در شبکه وابسته است [۸]. بر این اساس تزریق ولتاژ، به سه روش: هم فاز^۱ [۹]، پیش از خطا^۲ [۹] و حداقل انرژی^۳ [۱۰] صورت می‌پذیرد؛ که در ادامه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۲ جبران‌سازی هم فاز

دیاگرام برداری روش جبران‌سازی هم فاز در شکل (۲)، نشان داده شده است. در این روش ولتاژ DVR بصورت هم فاز با ولتاژ پس از خطای منبع (Vs) به سیستم تزریق می‌گردد. در این صورت طی دوره جبران‌سازی، فاز ولتاژ بار (VL) برابر با ولتاژ منبع است. بنابراین اگر در اثر خطا پرش زاویه فاز (δ)، در ولتاژ شبکه رخ دهد؛ زاویه فاز بار نیز به همان میزان جابجا خواهد شد.



شکل (۲): دیاگرام برداری روش جبران‌سازی هم فاز

با توجه به دیاگرام شکل (۲)، دامنه و زاویه ولتاژ تزریقی روش مزبور، بصورت زیر است:

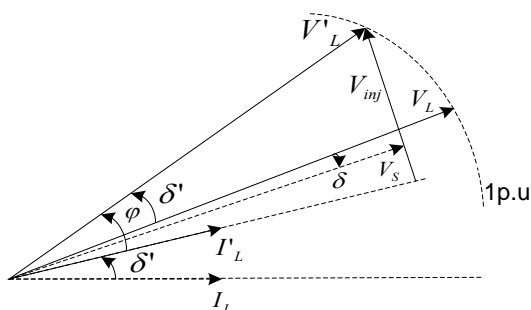
$$\begin{aligned} |V_{inj}| &= |V_L| - |V_S| \\ \angle V_{inj} &= \theta_S \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن، V_L ، V_S ، θ_S ، به ترتیب ولتاژ بار، ولتاژ شبکه و زاویه ولتاژ شبکه می‌باشد. از جمله مزایای روش مزبور،

می‌توان به حداقل بودن اندازه ولتاژ تزریقی DVR به‌ازای ولتاژ بار ثابت، اشاره نمود [۹]. کاربرد عملی این روش بیشتر در جبران کمبود ولتاژهای متقارن و نیز بارهای غیر حساس به پرش فاز می‌باشد.

۲-۲ جبران‌سازی به روش حداقل انرژی

در این روش، از حداکثر ظرفیت راکتیو DVR برای جبران کمبود ولتاژ استفاده می‌گردد. در این صورت ولتاژ DVR به‌گونه‌ای تزریق می‌شود؛ که طی دوره خطا جریان بار (I_L)، با ولتاژ شبکه (V_S) هم فاز باشد [۱۱]. دیاگرام برداری جبران کمبود ولتاژ به روش حداقل انرژی در شکل (۳) نشان داده شده است. با بکارگیری این روش، کمبود ولتاژهای سطحی (غیرعمیق) تنها با تزریق توان راکتیو جبران شده و مزیت آن این است؛ که عملاً محدودیت ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی و زمان جبران‌سازی در این حالت وجود ندارد. در مقابل، از عمده‌ترین معایب این روش، می‌توان به بزرگتر بودن اندازه ولتاژ تزریقی نسبت به سایر روش‌ها و عدم جبران‌سازی پرش فاز، اشاره نمود.



شکل (۳): دیاگرام برداری جبران‌سازی به روش حداقل انرژی

۳-۲ جبران‌سازی پیش از خطا

برای جبران کمبود ولتاژ در بارهای حساس به زاویه فاز، تنها گزینه موجود جبران ولتاژ بار به مقدار پیش از خطاست. با استفاده از این روش دامنه و فاز ولتاژ بار بطور دقیق بازیابی می‌گردد. در این صورت ولتاژ تزریقی DVR اختلاف میان ولتاژ مرجع بار (V_L) و ولتاژ منبع (شبکه) پس از خطا (V_S) می‌باشد. شکل (۴) دیاگرام برداری جبران‌سازی کمبود ولتاژ به روش پیش از خطا را نشان می‌دهد.

¹ In-Phase

² Pre-fault

³ Minimum Energy

و فاز مؤلفه اصلی ولتاژ و یا جریان، روش‌های مختلفی ارائه شده است؛ که از آن جمله می‌توان به تبدیل فوریه سریع^۱، فیلتر کالمن^۲، شبکه عصبی خطی تطبیق‌پذیر^۳ و روش حداقل مربعات^۴ اشاره نمود [۱۲-۱۵]. دو روش نخست به ترتیب به دلیل تأخیر به اندازه یک سیکل (۲۰ms) و نیم سیکل (۱۰ms) و روش سوم به علت حجم محاسباتی بالا، قادر به ردیابی و تخمین سریع دامنه و فاز نبوده و عملاً استفاده از این سه روش در سیستم کنترل به دلیل اهمیت سرعت پاسخ DVR امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در بین روش‌های فوق‌الذکر، روش حداقل مربعات با سرعت نسبی بالا بصورت Online تخمینی دقیق از دامنه و فاز ولتاژ ارائه می‌نماید. به منظور بررسی این الگوی تخمین، ولتاژ نمونه‌برداری شده شبکه بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V(k) = V_m \sin(2\pi k N_s + \varphi) \quad (5)$$

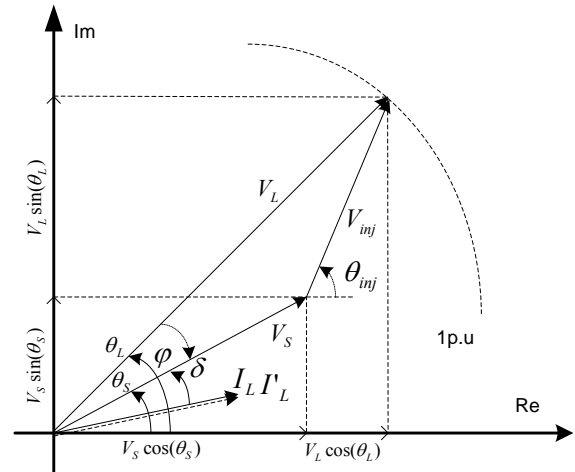
$$N_s = f_o / f_s, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

که در آن V_m و φ دامنه و فاز ولتاژ شبکه و f_o و f_s به ترتیب k امین نمونه از ولتاژ، فرکانس شبکه و فرکانس نمونه‌برداری است. با بسط عبارت $\sin(2\pi k N_s + \varphi)$ به ازای تعداد مشخصی از نمونه‌ها، می‌توان آخرین N از نمونه ولتاژ شبکه، $[V_k]_{N \times 1}$ ، را با اعمال روابط ریاضی و نوشتن نتایج به شکل ماتریسی بصورت زیر بیان کرد:

$$[V_k]_{N \times 1} = [M]_{N \times 2} \times [\hat{X}(k)]_{2 \times 1} \quad (6)$$

$$[M]_{N \times 2} = \begin{bmatrix} \sin 2\pi N_s(k-(N-1)) & \cos 2\pi N_s(k-(N-1)) \\ \sin 2\pi N_s(k-(N-2)) & \cos 2\pi N_s(k-(N-2)) \\ \dots & \dots \\ \sin 2\pi N_s(k-(N-N)) & \cos 2\pi N_s(k-(N-N)) \end{bmatrix}$$

$$[\hat{X}(k)] = \begin{bmatrix} \hat{V}_x(k) \\ \hat{V}_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\varphi) \\ V_m \sin(\varphi) \end{bmatrix}$$



شکل (۴): دیاگرام برداری جبران‌سازی به روش پیش از خطا

با توجه به دیاگرام برداری شکل (۴)، اندازه و زاویه ولتاژ تزریقی DVR در روش پیش از خطا بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{inj} &= \bar{V}_L - \bar{V}_S \\ &= (V_{LX} + jV_{LY}) - (V_{SX} + jV_{SY}) \\ &= (V_{LX} - V_{SX}) + j(V_{LY} - V_{SY}) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} V_{LX} &= V_L \cos \theta_L & V_{SX} &= V_S \cos \theta_S \\ V_{LY} &= V_L \sin \theta_L & V_{SY} &= V_S \sin \theta_S \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |V_{inj}| &= \sqrt{(V_{LX} - V_{SX})^2 + (V_{LY} - V_{SY})^2} \\ \angle V_{inj} = \theta_{inj} &= \tan^{-1} \left(\frac{V_{SY} - V_{LY}}{V_{SX} - V_{LX}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

اندازه ولتاژ تزریقی در استراتژی جبران پیش از خطا نسبت به روش هم فاز بیشتر است. همچنین توان اکتیو تزریقی بزرگ در این روش ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی را در طراحی DVR افزایش می‌دهد.

۳. استخراج مؤلفه توالی مثبت ولتاژ

استخراج مؤلفه‌های متقارن از ولتاژ شبکه شامل مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر، مستلزم ارائه روشی دقیق و سریع به منظور تخمین و یا ردیابی ولتاژ شبکه است. برای تخمین دامنه

¹ Fast Fourier Transform

² Kalman Filter

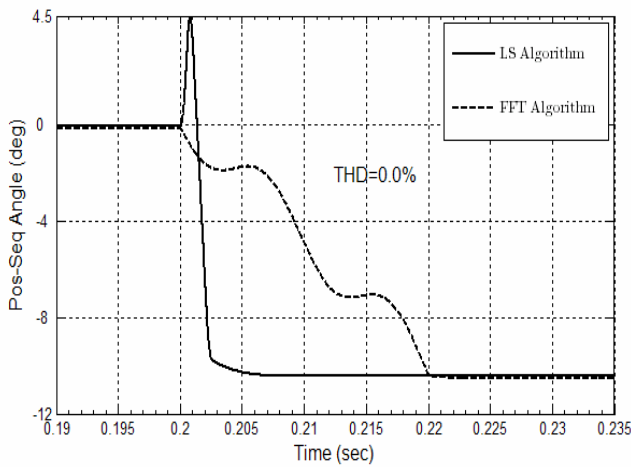
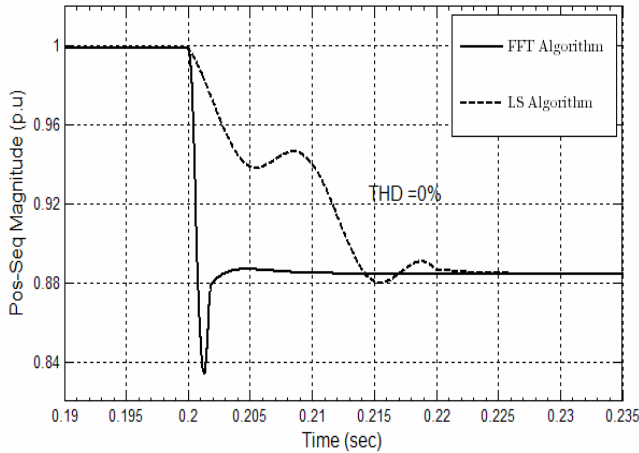
³ Adaptive Linear Combiner

⁴ Least Squares

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\bar{V}_p = \begin{bmatrix} 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle -120^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \angle \phi_a \\ V_b \angle \phi_b \\ V_c \angle \phi_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

در شکل (۵) استخراج دامنه و زاویه مؤلفه توالی مثبت ولتاژ شبکه با استفاده از روش حداقل مربعات، طی یک کمبود ولتاژ نامتقارن به‌ازای $N=10$ و $f_s=5\text{kHz}$ ارائه و با روش FFT مقایسه شده است.



شکل (۵): استخراج دامنه و زاویه مؤلفه مثبت ولتاژ در شرایط سینوسی طی یک کمبود ولتاژ نامتقارن

نتایج شکل (۵)، سرعت و دقت روش LS را در استخراج مؤلفه توالی مثبت ولتاژ در مقایسه با FFT تأیید می‌نماید. روش حداقل مربعات تنها در شرایط سینوسی دارای تخمینی دقیق از دامنه و زاویه است. در شرایط هارمونیک، بسته به THD شبکه، تخمین این روش حول دامنه و فاز مؤلفه اصلی ولتاژ نوسانی می‌باشد. شکل (۶) تخمین دامنه و زاویه مؤلفه

که در آن، N اندازه پنجره (تعداد نمونه‌های) تخمین LS است. با تعریف ماتریس شبه معکوس $[M_{PI}]_{N \times 2}$ معادله تعریف شده در رابطه (۶) قابل حل می‌باشد.

$$[M_{PI}]_{2 \times N} = ([M]_{2 \times N}^T \times [M]_{N \times 2})^{-1} \times [M]_{2 \times N}^T \quad (7)$$

بدین ترتیب، ولتاژ تخمین زده شده به روش حداقل مربعات در مختصات کارتزین از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$[\hat{X}(k)]_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} \hat{V}_X(k) \\ \hat{V}_Y(k) \end{bmatrix} = [M_{PI}]_{2 \times N} \times [V_k]_{N \times 1} \quad (8)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۸)، دامنه و زاویه تخمینی، بصورت رابطه (۹) قابل محاسبه است:

$$\hat{V}_m = \sqrt{\hat{V}_X(k)^2 + \hat{V}_Y(k)^2}, \quad \hat{\phi} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{V}_Y(k)}{\hat{V}_X(k)} \right) \quad (9)$$

با بکارگیری روش تخمین LS در شرایط سینوسی تنها با در اختیار داشتن سه نمونه از ولتاژ در هر زمان نمونه‌برداری ($N=3$)، می‌توان تخمینی دقیق از دامنه و فاز در دست داشت. نرخ نمونه‌برداری (f_s) بر اساس معیار نایکوئیست حداقل دو برابر فرکانس آخرین مرتبه هارمونیک ولتاژ سیستم تعیین می‌گردد. انتخاب f_s بالاتر، سرعت تخمین را افزایش داده و در مقابل، برای پردازش اطلاعات به DSP با سرعت بالاتر نیاز است. همچنین افزایش نرخ نمونه‌برداری، فراجش را در لحظات اولیه تخمین افزایش می‌دهد. انتخاب طول پنجره تخمین برابر با یک دهم نمونه‌های هر سیکل و با در نظر گرفتن نرخ نمونه‌برداری ۵ kHz، می‌توان تخمینی مناسب از ولتاژ در اختیار داشت.

با در دست داشتن دامنه و فاز ولتاژ در هر فاز شبکه، از طریق الگوی تخمینی ارائه شده و با استفاده از ماتریس تبدیل فورسکیو می‌توان مؤلفه‌های متقارن ولتاژ را محاسبه نمود. تحت این تبدیل مؤلفه مثبت ولتاژ شبکه بصورت زیر قابل محاسبه است:

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

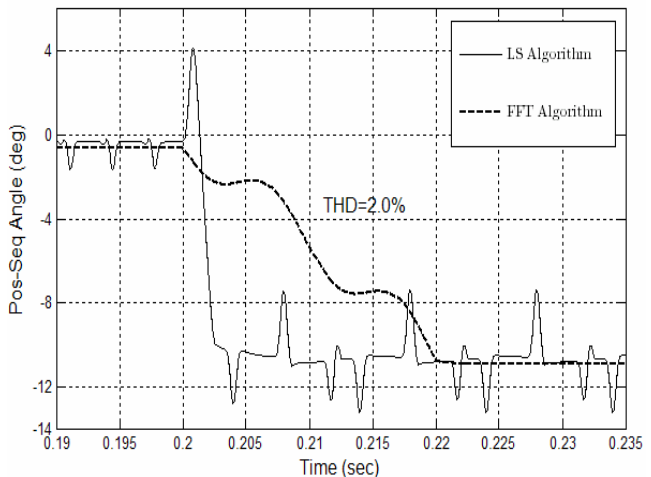
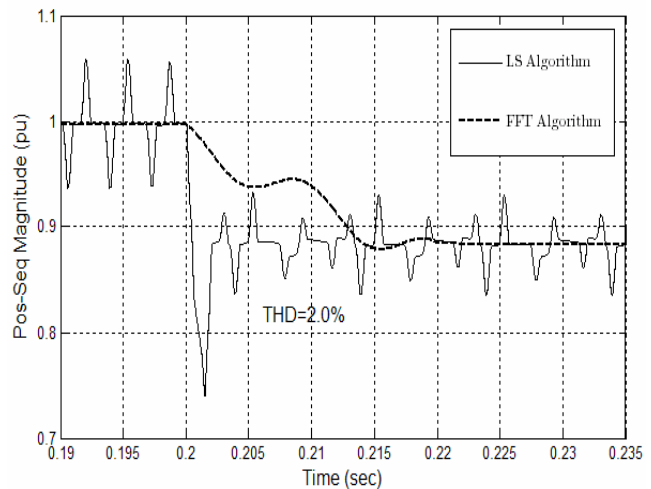
همانگونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود؛ در سیستم کنترل پیشنهادی، دامنه و فاز ولتاژ شین بار (V_L)، بصورت Online به روش LS تخمین زده شده و مؤلفه توالی مثبت آن استخراج می‌گردد. با توجه به انتخاب استراتژی جبران‌سازی پیش از خطا و همچنین به دلیل وجود پرش در زاویه فاز مؤلفه توالی مثبت، طی دوره کمبود ولتاژ، زاویه فاز مؤلفه مثبت (ϕ_p) با استفاده از المان‌های Sample & Hold در مقدار پیش از خطا ذخیره می‌شود. به منظور ثبت آخرین تغییرات بار تا پیش از بروز خطا در سیستم کنترل، فرمان Hold در این المان‌ها توسط سیستم تشخیص خطا صادر می‌گردد. وجود تأخیر در تشخیص خطا توسط این سیستم سبب می‌گردد؛ که زاویه فاز مؤلفه مثبت ولتاژ بار در مقدار پس از خطا ثبت گردد؛ که این امر خود سبب بروز خطا در جبران‌سازی کمبود ولتاژ است. برای رفع مشکل مزبور، بدین ترتیب عمل می‌شود که با توجه به فرکانس نمونه‌برداری تعیین شده در روش LS، تعداد نمونه‌هایی که معادل با تأخیر زمانی سیستم تشخیص خطا باشد؛ محاسبه گردیده و به اندازه همان تعداد نمونه، در ورودی المان‌های Sample & Hold تأخیر ایجاد می‌شود. در این صورت تعداد نمونه‌ها (N_d) مقداری صحیح است که از رابطه (۱۱) تعیین می‌گردد:

$$(T_d \times f_s) \leq N_d < (T_d \times f) + 1 \quad (11)$$

که در آن T_d تأخیر زمانی سیستم تشخیص خطا و f_s فرکانس نمونه‌برداری است. لازم به ذکر است که تأخیر ایجاد شده در زمان پاسخ‌دهی سیستم کنترل بی‌تأثیر بوده و با استفاده از آن آخرین تغییرات بار تا پیش از وقوع خطا ثبت می‌گردد. همچنین از تغییرات بار طی دوره جبران‌سازی صرف‌نظر می‌گردد.

بدین ترتیب با در دست داشتن زاویه فاز مؤلفه توالی مثبت ولتاژ بار در مقدار پیش از خطا و با فرض اینکه دامنه ولتاژ بار با جبران‌سازی در مقدار ۱ پریونیت بازیابی می‌گردد؛ به کمک توابع سینوسی، می‌توان ولتاژهای تزریقی لحظه‌ای مرجع را تولید نمود. به منظور حفظ سنکرونیزم توابع مزبور با شبکه به

توالی مثبت ولتاژ شبکه را در شرایط هارمونیک ($THD=2\%$)، طی یک کمبود ولتاژ نامتقارن نشان می‌دهد.



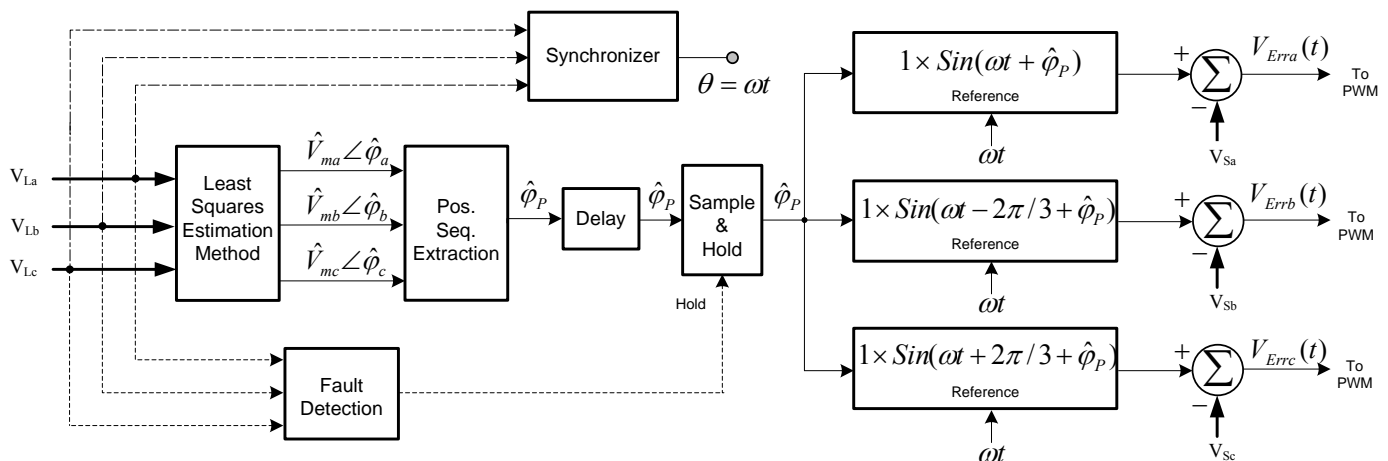
شکل (۶): استخراج دامنه و زاویه مؤلفه مثبت ولتاژ در شرایط

هارمونیک طی یک کمبود ولتاژ نامتقارن

همانگونه که از نتایج شکل (۶) ملاحظه می‌گردد؛ الگوی تخمین ارائه شده علی‌رغم سرعت مناسب از دقت کافی در استخراج مؤلفه توالی مثبت در شرایط هارمونیک برخوردار نمی‌باشد. بدین ترتیب کاربرد روش مزبور در سیستم کنترل DVR به شرایط سینوسی شبکه محدود می‌گردد.

۴. سیستم کنترل پیشنهادی

بر اساس الگوی تخمین ولتاژ به روش حداقل مربعات و استخراج مؤلفه مثبت ولتاژ در بخش قبل، سیستم کنترل پیشنهادی DVR برای جبران انواع مختلف کمبود ولتاژ به روش پیش از خطا در شکل (۷) ارائه شده است.



شکل (۷): سیستم کنترل پیشنهادی

همانطور که در شکل (۸) ملاحظه می‌گردد؛ در شبکه مورد مطالعه، مرکز تولید از طریق خط انتقال ۱۱۵ kV به مراکز مصرف متصل شده است. همچنین سیستم مزبور در بخش توزیع، متشکل از دو فیدر ۱۱ kV است؛ که توان مورد نیاز بارهای متصل را تأمین می‌نمایند. جهت فراهم آوردن شرایط شبیه‌سازی، مطابق شکل (۸)، در انتهای فیدر ۱ اتصال کوتاه‌های مختلفی (سه فاز به زمین، دو فاز به زمین و تک فاز به زمین) در لحظه $t=0/1s$ و با دوره $200ms$ ، در نظر گرفته شده است.

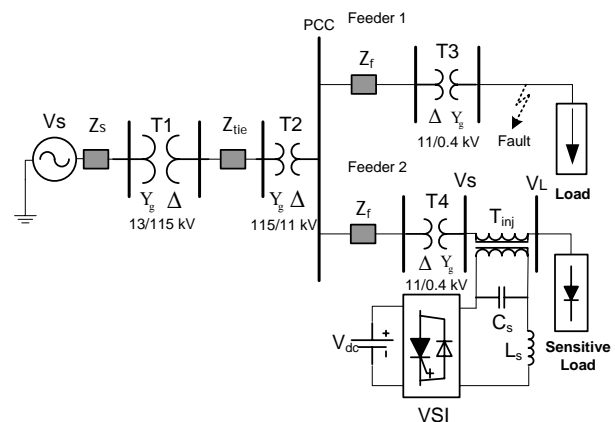
بسته به نوع اتصال کوتاه‌ها، کمبود ولتاژهای متقارن و نامتقارنی در فیدر ۲ سیستم توزیع رخ می‌دهد. بدین ترتیب، با فرض حساس بودن بار فیدر ۲ نسبت به کمبود ولتاژ و به منظور حفاظت از آن، یک DVR از طریق سه ترانسفورماتور تک‌فاز به فیدر مزبور متصل شده است.

در ساختمان DVR از باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی و سه اینورتر تک‌فاز با کلیدهای GTO که به روش مدولاسیون عرض پالس (SPWM) کلیدزنی می‌شود، استفاده شده است. در بخش‌های ۱-۵ تا ۳-۵، نتایج حاصل از جبران‌سازی کمبود ولتاژ در فیدر ۲ ناشی از اتصال کوتاه‌های سه فاز، دو فاز و تک‌فاز به زمین توسط DVR نصب شده در این فیدر نشان داده شده است.

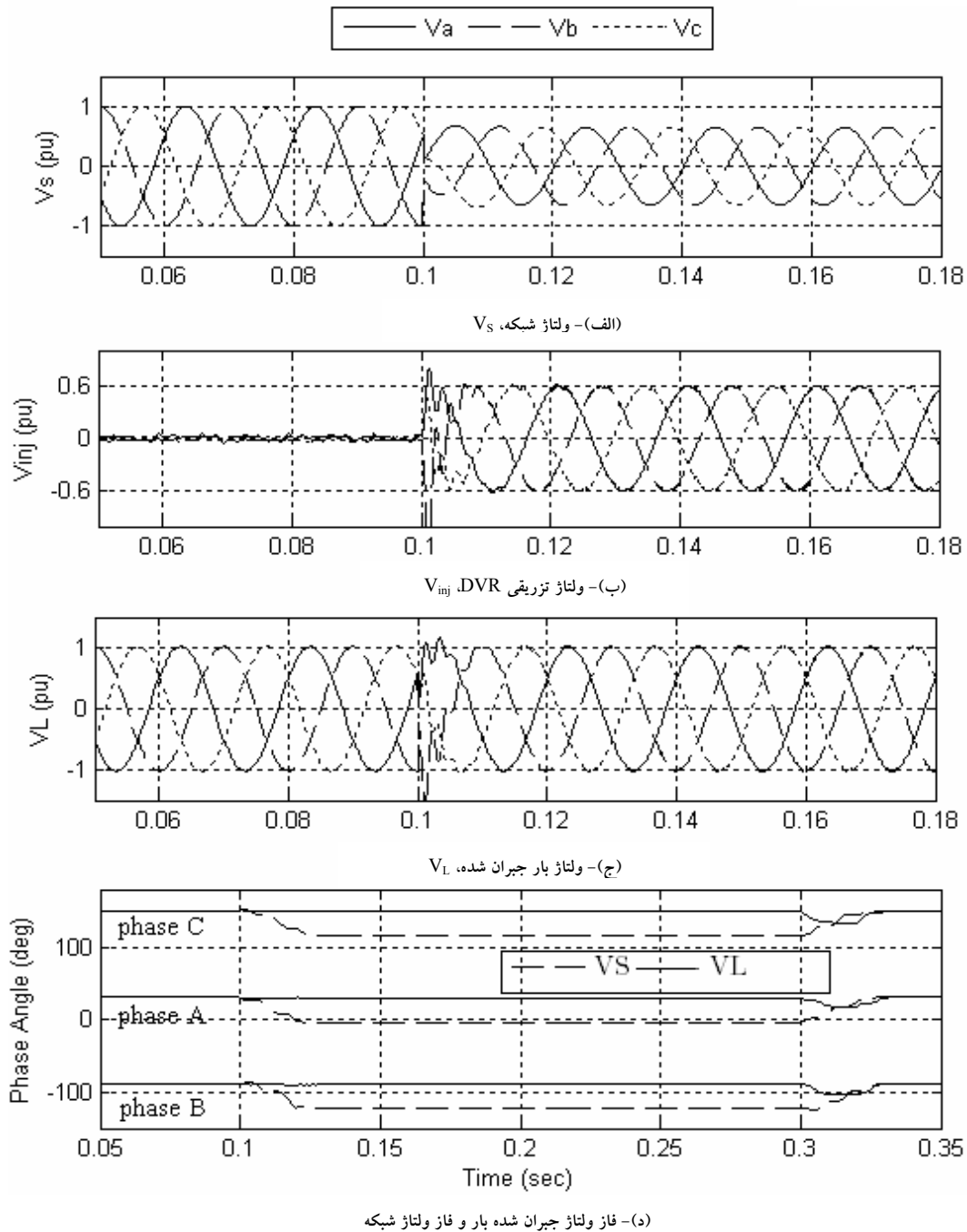
ساختار کنترلی ویژه‌ای نیاز است؛ که قادر به ردیابی دقیق و سریع زاویه فاز $\theta = \omega t$ از ولتاژ سیستم باشد. اختلاف ولتاژهای مرجع و ولتاژ شبکه (V_s)، ولتاژ خطای سیستم کنترل را نتیجه می‌دهد. این ولتاژ شامل مؤلفه توالی‌های منفی، صفر و بخشی از مؤلفه توالی مثبت است که می‌بایست جبران گردد. ولتاژ خطای سیستم کنترل نهایتاً به مدولاتور پهنای پالس (PWM) برای تعیین الگوی کلیدزنی اینورتر اعمال می‌گردد.

۵. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

شبکه نشان داده شده در شکل (۸)، با پارامترهای مندرج در جدول ضمیمه، به کمک نرم افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده است.



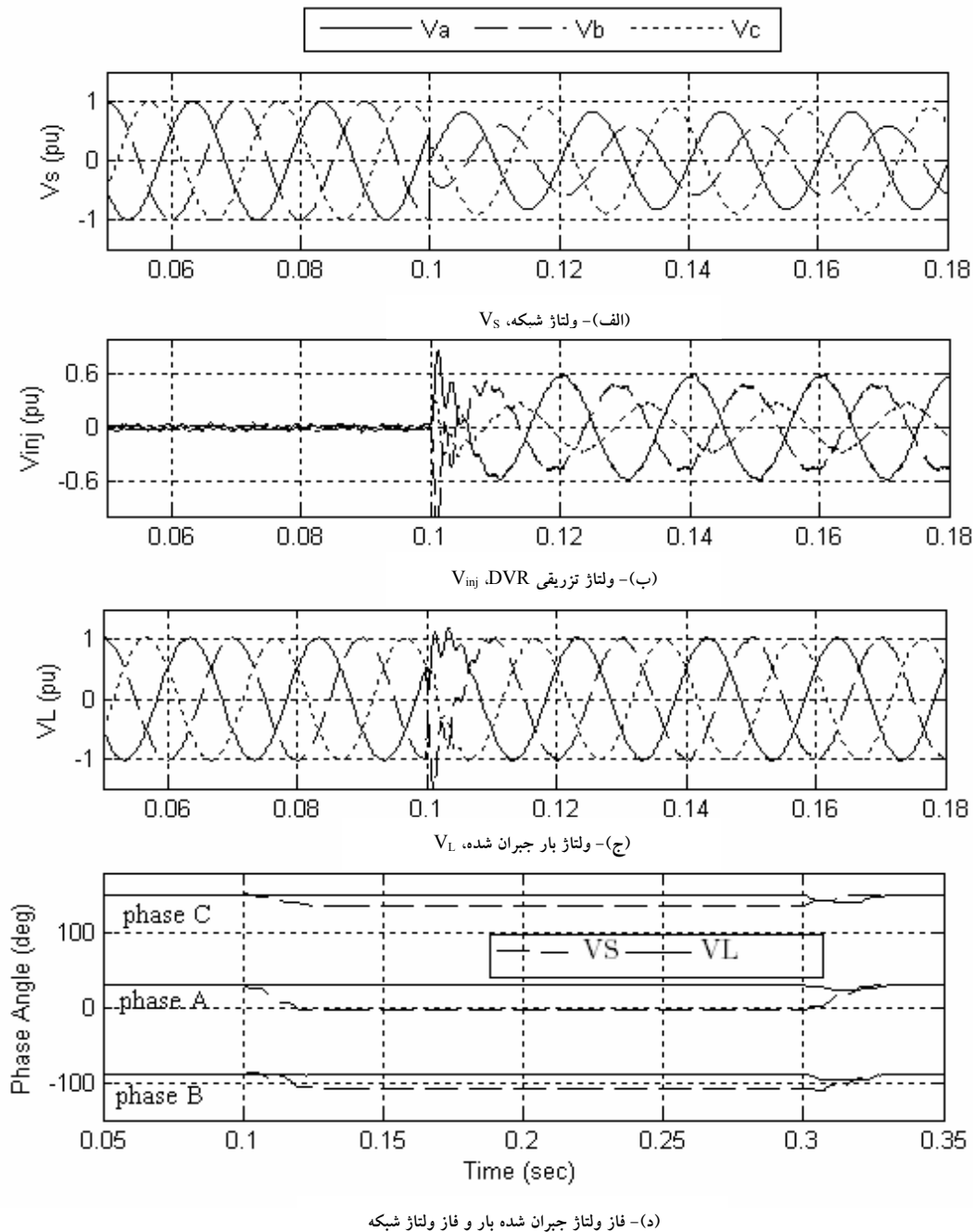
شکل (۸): شبکه مورد مطالعه



شکل (۹): جبران‌سازی دامنه و فاز ولتاژ بار حساس به کمک DVR طی رخداد اتصال کوتاه سه فاز

با وقوع کمبود ولتاژ، سیستم کنترل با تخمینی سریع و دقیق زاویه فاز مؤلفه مثبت، سه ولتاژ متقارن با دامنه $0/6$ پریونیت به شبکه تزریق می‌نماید. نتایج بندهای (ج) و (د) نشان دهنده قابلیت سیستم کنترل پیشنهادی در بازبازی دقیق دامنه و زاویه ولتاژ بار در کمبود ولتاژ متقارن است.

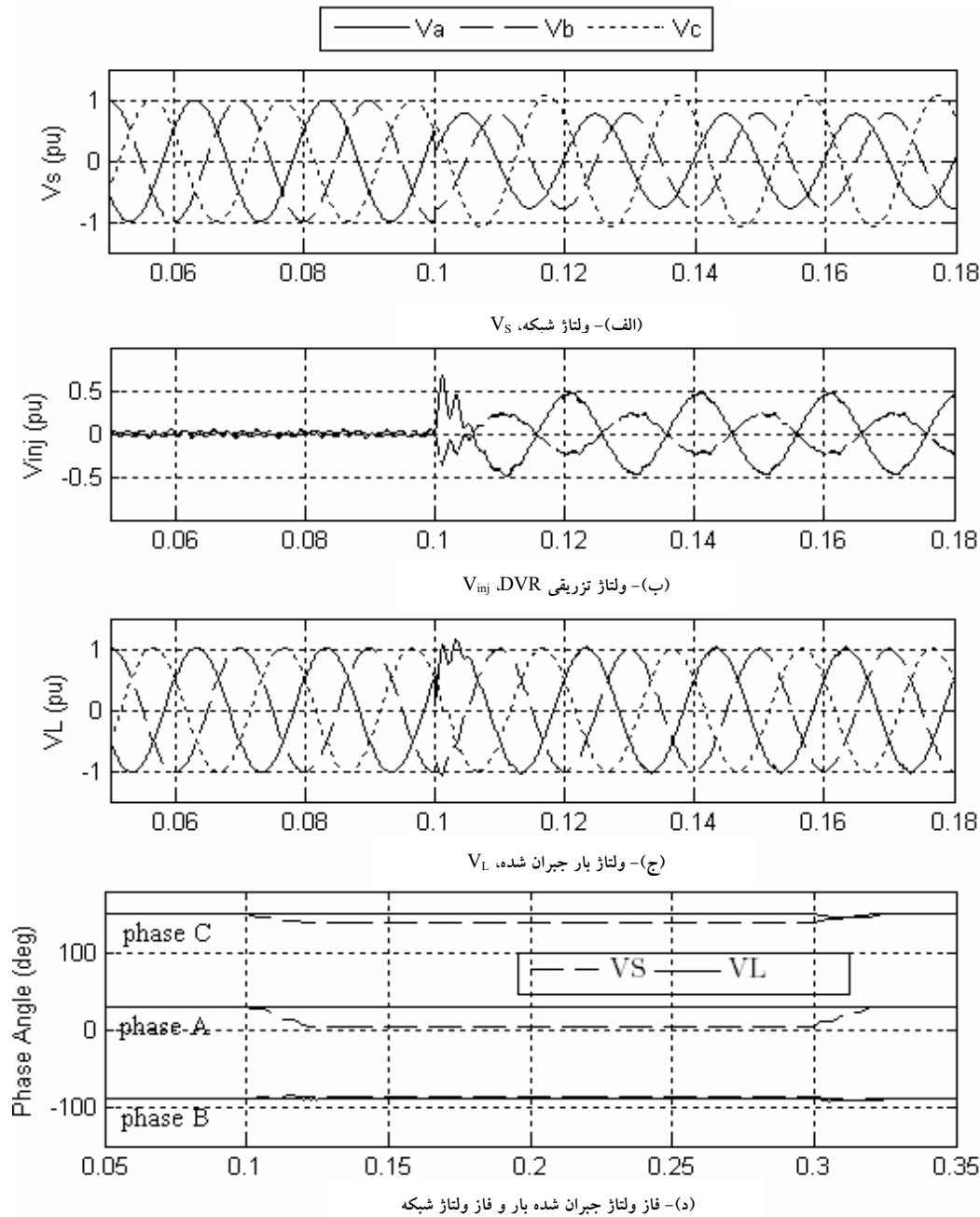
شکل (۹)، نتایج جبران‌سازی کمبود ولتاژ را توسط سیستم کنترل پیشنهادی، ناشی از اتصال کوتاه سه فاز متقارن در انتهای فیدر ۱، نشان می‌دهد. مطابق با شکل موج‌های بندهای (الف) و (د)، کمبود ولتاژ و پرش فاز بوجود آمده در هر یک از فازهای ولتاژ بار (V_L) به ترتیب برابر با $0/32$ پریونیت و $33/6$ - درجه است.



شکل (۱۰): جبران‌سازی دامنه و فاز ولتاژ بار حساس به کمک DVR طی رخداد اتصال کوتاه دو فاز

نکته قابل توجه از نتایج بدست آمده آن است؛ که ولتاژ تزریقی DVR در فاز C (V_{cinj}) به دلیل استراتژی جبران‌سازی پیش از خطا و تنها به منظور جبران زاویه در این فاز تزریق می‌گردد. با توجه به شکل موج‌های ولتاژ بار و زاویه فاز آن در بندهای (ج) و (د) ملاحظه می‌شود؛ که در این حالت نیز سیستم کنترل پیشنهادی، DVR را قادر می‌سازد؛ تا دامنه و فاز ولتاژ بار را بطور دقیق به مقدار پیش از خطا بازبایی نماید.

عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی طی اتصال کوتاه دو فاز به زمین (فازهای a و b) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در اثر این اتصال کوتاه، کمبود ولتاژ و پرش زاویه فازی به ترتیب برابر با (۰ و ۰/۴ و ۰/۲) پریونیت و (۱۴- و ۱۸- و ۳۴-) درجه، در هر یک از فازهای ولتاژ بار رخ داده است. بگونه‌ای که ملاحظه می‌گردد؛ دامنه ولتاژ بار در فاز C طی دوره خطا تأثیر نمی‌پذیرد و این فاز تنها دارای پرش فاز است.



شکل (۱۱): جبران‌سازی دامنه و فاز ولتاژ بار حساس به کمک DVR طی رخداد اتصال کوتاه تک فاز

مطابق شکل (۱۰-الف)، طی این اتصال کوتاه، به دلیل اتصال ترانسفورماتورهای شبکه، دامنه ولتاژ بار در فاز C دارای ۱۰ درصد بیشبود است. نتایج بدست آمده در بندهای (ج) و (د) مشخص کننده قابلیت سیستم کنترل پیشنهادی در بازیابی دقیق دامنه و زاویه ولتاژ بار در کمبود و بیشبود ولتاژهای نامتقارن است.

شکل (۱۱)، نتایج جبران‌سازی کمبود ولتاژ در فیدر ۲ ناشی از اتصال کوتاه در فاز a از فیدر ۱ نشان داده شده است. بگونه‌ای که در بندهای (الف) و (د)، ملاحظه می‌گردد؛ کمبود ولتاژ و پرش زاویه فاز بوجود آمده در هر یک از فازهای ولتاژ بار (V_L) به ترتیب عبارتند از: (۰/۱- و ۰/۲ و ۰/۲) پریونیت و (۰ و ۱۰/۲ و ۲۴/۵-) درجه.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله برای نخستین بار الگوی تخمین حداقل مربعات برای تخمین ولتاژ در سیستم کنترل DVR معرفی گردید. تحلیل صورت گرفته در بخش ۳ نشان داد؛ که در شرایط سینوسی، با انتخاب بهینه طول پنجره تخمین، روش LS سرعت و دقت کافی برای بکارگیری در سیستم کنترل DVR را دارد. بر اساس این الگوی تخمین، سیستم کنترل نوینی به منظور جبران انواع کمبود ولتاژ به روش پیش از خط ارائه گردید.

نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ نشان می‌دهد؛ که سیستم پیشنهادی، کارایی لازم برای جبران انواع کمبود ولتاژ را داراست. در شرایط سینوسی شبکه، جبران‌سازی دامنه و فاز به طور دقیق صورت می‌گیرد؛ در این حالت بسته به فرکانس نمونه‌برداری و طول پنجره تخمین می‌توان سرعت پاسخ را به ۲ms کاهش داد.

۷. ضمیمه

مقادیر	پارامترهای سیستم
$0.3 + j2.1 \Omega$	امپدانس منبع Z_S
$0.1 + j0.5 \Omega$	امپدانس خط Z_{tie}
$0.01 + j0.03 \Omega$	امپدانس فیدر Z_f
۵۰ Hz	فرکانس
مقادیر	پارامترهای DVR
۲۰ kVA	قدرت نامی
۰.۳ kV	ولتاژ ذخیره ساز انرژی
٪۸	راکتانس ترانس های تزریقی
۴ kHz	فرکانس کلیدزنی
مقادیر	مشخصات بار
۳۰ kW $\cos \varphi = 1$	بار ۱
۱۵ kW $\cos \varphi = 0.9$	بار ۲ (RL)

۸. مراجع

- [1] Aaulborg University "Employment and Control of CUPS in The Distribution Network" 2000-2001.
- [2] M. Bollen. "Understanding Power Quality Problems, voltage sags and intruptions" IEEE press, 1999.
- [3] A. K. Ramasamy, R. K. Iyer, V. K. Ramachandaramutjy, and R. N. Mukerjee, "Dynamic Voltage Restorer For Voltage Sag Compensation" International IEEE Conference on Power Electronics and Drives Systems, PEDS, Vol. 2, pp. 1289-1294, 2005.
- [4] J. G. Nielsen, F. Blaabjerger, and N. Mohan, "Control Strategies for Dynamic Voltage Restorer Compensating Voltage sags with Phase Jump" Sixteenth Annual IEEE Conference on Applied Power Electronics, APEC, Vol. 2, pp. 1267-1273, 2001.
- [5] 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," Seventeenth Annual IEEE Conference on Applied Power Electronics, APEC, Vol. 2, pp. 1068-1073, 2002.
- [6] C. Zhan, C. Fitzer, V. K. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, M. Barnes, and N. Jenkins "Software Phase-Locked Loop Applied to Dynamic Voltage Restorer (DVR)" IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 1033-1038, 2001.
- [7] H. Monsef, and B. Tamimi, "The Operation of DVR in Voltage Sag Mitigation Using EMTP", International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing, No. 2, pp. 102-106, April 2006.
- [8] A. M. Munoz, D. Oterino, M. Gonzalez, and F. A. Olivenicia, "Study of sag compensation with DVR" Electrotechnical Conference, IEEE Mediterranean 2006, MELECON, pp. 990-993, May 2006.
- [9] I. Y. Chung, D. J. Won, S. Y. Park, S. I. Moon, and J. K. Park, "The DC Link

- Energy Control Method in Dynamic Voltage Restorer System”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 25, No. 7, pp. 525–531, September 2003.
- [10] D. M. Viliathgamuwa, A. A. D. Ranjith Prera, and S. S. Choi, “Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003.
- [11] C. Meyer, C. Romaus, and R. W. De Doncker, “Optimized Control Strategy for a Medium-Voltage DVR” 36th IEEE, PESC, Power Electronics Specialists Conference, pp. 1887-1893, 2005.
- [12] A. Campos, G. Joos, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, “A DSP-Based Real-Time Digital Filter For Symmetrical Components,” Athens Power Tech, APT 93. Proceedings. Joint International Power Conference, Vol. 1, pp. 75–79, September 1993.
- [13] S. A. Soliman and M. E. El-Hawary, “Application of Kalman Filtering for Online Estimation of Symmetrical Components for Power System Protection,” Electric Power System research, Vol. 38, No. 2, pp. 113–123, August 1996.
- [14] P. K. Dash, D. P. Swain, A. C. Liew, and S. Rahman, “An Adaptive Linear Combiner For On-Line Tracking of Power System Harmonics” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996.
- [15] X. Jiang, J. King, and A. Emadi “A Power Harmonics Detection Approach Based on Least Squares Energy Minimization Principle” 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2004.