

کنترل هماهنگ ادوات FACTS نسل اول با استفاده از شبکه عصبی و به منظور افزایش پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت

مهدی قاسمی^(۱) - علی رضا روستا^(۲) - بهادر فانی^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز

(۳) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۰

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۸۹

خلاصه: این مقاله، به منظور افزایش پایداری گذرا و همچنین افزایش میرایی سیستم روشی خاص از هماهنگی بین ادوات FACTS را ارائه می‌دهد. به منظور افزایش عملکرد و استفاده از کلیه ویژگی‌های TCSC و SVC که در این مقاله ارائه گردیده، لازم است کنترل کننده‌ای مورد استفاده قرار گیرد که محدودیت‌های سایر کنترل کننده‌ها را نداشته و در عین سادگی، قابلیت پاسخگویی سریع و تطبیق با مدل سیستم قدرت را نیز دارا باشد. از این رو این ویژگی‌ها را می‌توان در کنترل کننده‌های هوشمند یافت که شبکه ADALINE از جمله این کنترل کننده‌ها است. برای درک بهتر نسبت به عملکرد کنترل کننده شبکه ADALINE، این کنترل کننده با یک کنترل کننده که توسط شاخص کنترل بهینه (LQR) طراحی شده مقایسه می‌گردد. مدل به کار گرفته شده جهت ادوات FACTS از نوع جریان تزریقی است و به همین دلیل این امکان وجود داشته تا بتوان از یک ماتریس Y_{bus} فاکتورگیری شده‌ی ثابت در محاسبات استفاده نمود. نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل غیرخطی شبکه نشان می‌دهد که کنترل کننده شبکه عصبی ADALINE در مقایسه با کنترل کننده LQR عملکرد بهتری داشته و بهبود قابل توجهی بر روی میرایی و افزایش توان انتقالی در سیستم قدرت را موجب می‌گردد.

کلمات کلیدی: پایداری گذرا، مدل تزریق جریانی، شبکه عصبی ADALINE، TCSC، SVC.

۱- مقدمه

می‌تواند به تنهایی یا با هماهنگی دیگر کنترل کننده‌ها یک یا چند پارامتر از سیستم قدرت را کنترل نمایند. یکی از شاخص‌ترین این کنترل کننده‌ها جبران کننده استاتیکی موازی (SVC) می‌باشد که یکی از عناصر اصلی ادوات FACTS نسل اول می‌باشند. SVC معمولاً در سیستم‌های فشار قوی نصب و باعث بهبود عملکرد سیستم قدرت می‌شوند [۱۱-۶].

عملکرد SVC بدین صورت است که با کنترل سریع توان راکتیو در نقطه‌ای خاص از شبکه و تنظیم ولتاژ سیستم، باعث بهبود پایداری گذرا، افزایش ضریب توان و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در سیستم انتقال می‌گردد.

یکی دیگر از کنترل کننده‌های FACTS نسل اول، خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) می‌باشد، که در سال ۱۹۸۶ به وسیله ویتایاتیل و دیگران، به عنوان روش تنظیم سریع امپدانس شبکه معرفی

در سالهای اخیر بدلیل مشکلات زیست محیطی، تولید انرژی و ... توسعه و افزایش شبکه‌های انتقال انرژی الکتریکی کاهش یافته است. با این حال، افزایش تقاضا و نیاز روز افزون به انرژی، قابلیت ضریب اطمینان و تأمین انرژی همچنان از مسائل مهم و کاربردی در صنعت برق می‌باشند. لذا استفاده از تجهیزات جدید و پیشرفته و به کارگیری این تجهیزات با ادوات الکترونیک قدرت در دستور کار مطالعاتی مهندسی صنعت برق قرار گرفته است [۱]. برای افزایش عملکرد عملیاتی سیستم‌های انتقال در دهه ۷۰، فن آوری FACTS تولید و به بازار ارائه گردید. ادوات FACTS ظرفیت‌های جدیدی را برای کنترل توان و افزایش ظرفیت قابل بهره برداری از خطوط موجود فراهم می‌کنند [۶-۲].

فن آوری FACTS مجموعه‌ای از کنترل کننده‌ها می‌باشند که هر یک

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_f + (X_d - X'_d) \cdot I_d - E'_q}{T'_{d0}} \quad (۳)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{-(X_q - X'_q) \cdot I_q - E'_d}{T'_{d0}} \quad (۴)$$

$$T_e = E'_d \cdot I_d + E'_q \cdot I_q - (X'_d - X'_q) I_d \cdot I_q \quad (۵)$$

$$V_d = E'_d - R_s \cdot I_d + X'_q \cdot I_q \quad (۶)$$

$$V_q = E'_q - R_s \cdot I_q + X'_d \cdot I_d \quad (۷)$$

δ زاویه روتور ژنراتور سنکرون

ω_B تغییرات سرعت روتور بر حسب rad/s

S_m لغزش ژنراتور بر حسب pu

S_{m0} لغزش ابتدایی ژنراتور بر حسب pu

H ثابت اینرسی

D ضریب میرایی

T_m توان مکانیکی ورودی بر حسب pu

T_e توان الکتریکی خروجی بر حسب pu

E_{fd} ولتاژ تحریک سیستم بر حسب pu

T'_{d0} ثابت زمانی گذرای مدار باز در محور d

T'_{q0} ثابت زمانی گذرای مدار باز در محور q

X_d راکتانس سنکرون محور d

X'_d راکتانس گذرا محور d

X_q راکتانس سنکرون محور q

X'_q راکتانس گذرا محور q

۳- ساختار مدل جریان تزریقی TCSC

با نصب تاسیسات TCSC عملاً ماتریس ادیتمانس سیستم Y_{bus} به یک ماتریس نامتقارن تبدیل می‌گردد. زمانی که از TCSC برای شبیه‌سازی در حوزه زمان استفاده می‌گردد، لازم است ماتریس Y_{bus} در هر تکرار تغییر کند. این روش شرایط خوبی را به همراه نخواهد داشت، زیرا یک ماتریس Y_{bus} فاکتورگیری شده‌ی ثابت، زمانی که که سیستم در شرایط پایداری گذرا است، مکرراً نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به همین دلیل مدل تزریق جریانی TCSC برای جلوگیری از تغییرات ماتریس Y_{bus} ارائه گردیده است. این مدل تزریق جریانی می‌تواند برای پایداری سیگنال کوچک و مطالعات پایداری گذرا مورد استفاده قرار گیرد. این روش دارای مزیت سرعت در محاسبات و همچنین حافظه رایانه‌ای کمتر در مقایسه با روش ماتریس Y_{bus} متغیر می‌باشد [۲۲].

شکل (۱) مدل مداری یک TCSC را نشان می‌دهد که به صورت سری با یک خط انتقال با راکتانس X_1 و Z و بین شین‌های i و k قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره شد TCSC به عنوان یک خازن متغیر عمل می‌کند. در شکل‌های (۱) و (۲)، \bar{I}_i و \bar{I}_k فازور جریان تزریقی در شین‌های i و k می‌باشند و \bar{V}_c اختلاف پتانسیل دو سر TCSC را

گردید [۱۲]. این طرح شامل خازن جبران ساز سری است که با راکتور کنترل شده با ترستور، موازی شده است. TCSC نیز باعث افزایش ظرفیت توان انتقالی، افزایش پایداری گذرا، کاهش تلفات خطوط انتقال و میرایی نوسانات توان می‌شود [۱۳]، [۱۴].

در همین راستا برای بهره‌گیری کامل از ویژگی‌های ادوات FACTS، نیاز به یک کنترل کننده مناسب احساس می‌گردد. کنترل کننده مورد استفاده باید بتواند با انطباق خود با سیستم قدرت و به صورت هماهنگ با آن، این ادوات را کنترل نموده و مشکلات سایر کنترل کننده‌ها از قبیل تأثیرپذیری از نقطه کار، بهینه نمودن ضرائب و ... را نداشته باشد. با نگاه اجمالی به انواع کنترل کننده‌های مورد استفاده، این ویژگی‌ها به طور خاص در کنترل کننده‌هایی که بر پایه شبکه عصبی استوارند، حاصل می‌شود. در این مقاله از شبکه عصبی ADALINE برای کنترل هماهنگ TCSC و SVC بهره گرفته شده است.

تکنیک روش ADALINE به خوبی در تئوری شبکه‌های عصبی شناخته شده است. از این تکنیک در چندین گرایش مهندسی برق همچون ردیابی فرکانس [۱۵]، [۱۶]، تشخیص اغتشاشات گذرا و پایدار در خطوط انتقال فشار قوی [۱۷]، تعیین و تشخیص سیگنال‌های ولتاژ و جریان در یک سیستم سه فاز نامتعادل [۱۸] و شناسایی هارمونیک‌های سیستم [۱۹] می‌توان بهره گرفت.

از مهمترین مزیت‌های این تکنیک می‌توان ساختار ساده، سرعت بالای پردازش اطلاعات و توانایی آموزش آنلاین شبکه را بر شمرد. علاوه بر موارد یاد شده وزن‌های شبکه ADALINE می‌تواند یک تفسیر فیزیکی مناسب از سیستم را ارائه نمایند [۱۹]، [۲۰]. از مطالب یاد شده به این نتیجه می‌توان دست یافت که این تکنیک (ADALINE)، برای شناسایی پارامترهای سیستم‌های خطی عملکردی بسیار کارآمد و موثر از خود نشان خواهد داد. مدل کنترلی ارائه شده با دریافت سیگنال‌های مختلف از چندین قسمت سیستم، عملیات کنترل TCSC را به طور ترکیبی و هماهنگ با عملیات کنترل SVC انجام داده و در نهایت منجر به افزایش توان انتقالی و پایداری ولتاژ در سیستم قدرت می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت (SMIB) و مقایسه آن با یک مدل کنترلی (LQR) نشان می‌دهد که کنترل کننده ارائه شده می‌تواند باعث افزایش پایداری گذرا و بهبود میرایی سیستم قدرت نسبت به مدل کنترلی (LQR) گردد.

۲- ژنراتور سنکرون

بر اساس مدل دینامیکی ارائه شده برای ژنراتور سنکرون [۲۱] می‌توان معادلات حالت مکانیکی و الکتریکی (۱) تا (۷) را در دستگاه مرجع $d-q$ به صورت زیر نوشت.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_B (S_m - S_{m0}) \quad (۱)$$

$$\frac{dS_m}{dt} = \frac{1}{2H} (-D(S_m - S_{m0}) + T_m + T_e) \quad (۲)$$

در معادلات (۱۰) و (۱۱) $K_c = X_c / X_1$ را درجه جبران‌سازی TCSC تعریف می‌کنیم که به طور مشخص به راکتانس خط انتقال وابسته می‌باشد.

معادلات فوق برای شبیه‌سازی مدل تزریق جریان TCSC در حوزه زمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. با انتقال این معادلات به قاب مرجع d-q شبکه قدرت، طبق معادلات (۱۲) الی (۱۵) این مولفه‌ها با سایر مولفه‌های دیگر در سراسر شبکه کوپل می‌شوند، که معادلات آنها بدین صورت محاسبه می‌گردند:

$$\bar{I}_{is} = I_{iD} + jI_{iQ} \quad (12)$$

$$\bar{I}_{ks} = I_{kD} + jI_{kQ} \quad (13)$$

$$\bar{V}_{is} = V_{iD} + jV_{iQ} \quad (14)$$

$$\bar{V}_{ks} = V_{kD} + jV_{kQ} \quad (15)$$

با جایگزینی (۱۲) الی (۱۵) در (۱۰) و (۱۱)، معادلات جبری (۱۶) الی (۱۹) برای مدل تزرفی جریان TCSC حاصل می‌گردد:

$$I_{iD} = \frac{K_c}{X_1(1-K_c)} (-V_{iQ} + V_{kQ}) \quad (16)$$

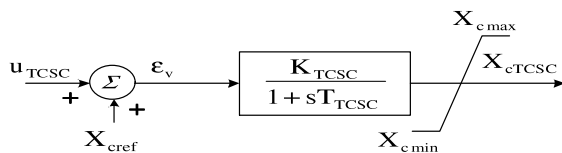
$$I_{iQ} = \frac{K_c}{X_1(1-K_c)} (V_{iD} - V_{kD}) \quad (17)$$

$$I_{kD} = \frac{K_c}{X_1(1-K_c)} (V_{iQ} - V_{kQ}) \quad (18)$$

$$I_{kQ} = \frac{K_c}{X_1(1-K_c)} (-V_{iD} + V_{kD}) \quad (19)$$

نظر به حضور پارامتر درجه جبران‌سازی K_c در روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت که این پارامتر به خوبی می‌تواند در میرایی نوسانات سیستم قدرت موثر واقع شود.

شکل (۵) بلوک دیاگرام مدل کنترلی یک TCSC را نشان می‌دهد که از آن برای حالت گذرا و مطالعات پایداری دینامیکی سیستم قدرت استفاده می‌شود [۲۲].



شکل (۵): بلوک دیاگرام کنترلی TCSC
Fig. 5: Control block diagram of TCSC

۴- ساختار مدل جریان تزرفی SVC

شکل (۶) یک SVC متصل به شین k و شکل (۷) مدل جریان تزرفی آن را نشان می‌دهد. در این مقاله عملکرد SVC مانند یک خازن با ظرفیت متغیر مورد مطالعه قرار گرفته است. \bar{I}_{ksvc} فازور جریان SVC در شین k است، که برای محاسبات حوزه زمان در SVC طبق معادله (۲۰) بیان می‌گردد:

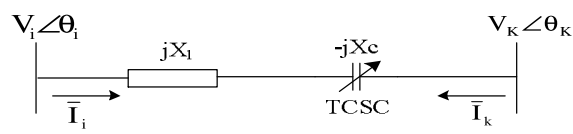
$$\bar{I}_{ksvc} = -j\bar{V}_k \cdot B_{svc} \quad (20)$$

نمایش می‌دهد. به کمک شکل‌های (۱) و (۲) می‌توان روابط زیر را نوشت:

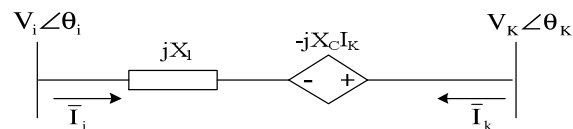
$$\bar{I}_k = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_i}{j(X_1 - X_c)} \quad (8)$$

$$\bar{V}_c = -j\bar{I}_k \cdot X_c \quad (9)$$

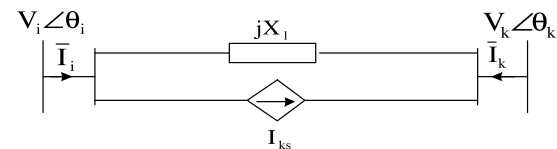
برای مجموعه روابط فوق، می‌توان مدار معادل شکل (۲) را ارائه نمود و مدل تزرفی از طریق جایگزینی ولتاژ \bar{V}_c به وسیله یک منبع جریان وابسته (\bar{I}_{ks}) به صورت موازی با خط به دست می‌آید (شکل ۳). چنانچه مدار معادل شکل (۳) را به صورت شکل (۴) ارائه نمائیم، معادلات (۱۰) و (۱۱) توصیف‌کننده مدار معادل تزریق جریان TCSC خواهند بود.



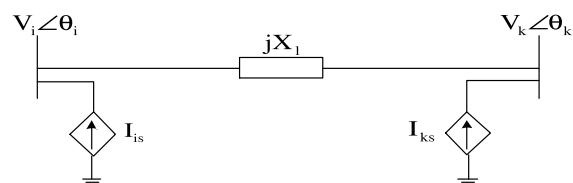
شکل (۱): نمایش یک TCSC
Fig. 1: Representation of a TCSC



شکل (۲): مدار معادل TCSC
Fig. 2: TCSC equivalent circuit with dependent voltage source



شکل (۳): مدار معادلی دیگر برای TCSC
Fig. 3: TCSC equivalent circuit with dependent current source



شکل (۴): مدل تزریق جریان برای TCSC
Fig. 4: Current injection model for a TCSC

$$\bar{I}_{ks} = \frac{\bar{V}_c}{jX_1} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_i}{j(X_1 - X_c)} \frac{X_c}{X_1} = j \frac{K_c}{X_1(1-K_c)} (\bar{V}_k - \bar{V}_i) \quad (10)$$

$$\bar{I}_{is} = -\bar{I}_{ks} = -j \frac{K_c}{X_1(1-K_c)} (\bar{V}_k - \bar{V}_i) \quad (11)$$

که X بردار حالت با رتبه n ، U بردار ورودی با مرتبه m ، Y بردار خروجی با مرتبه r ، A ، B و C به ترتیب ماتریس‌های حالت، ورودی و خروجی هستند. روشی عمومی برای طراحی کنترل‌کننده‌های LQR به این قرار است که با استفاده از قانون کنترلی $U = -KX$ تابع هدف J که در فرم مربعی خطی می‌باشد، می‌نیمد:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (27)$$

ماتریس‌های R و Q ماتریس‌های وزنی معین مثبت می‌باشند. ضریب بهره کنترلی K را می‌توان از حل ماتریس معین مثبت M مطابق معادلات ریگاتی زیر به دست آورد:

$$A^T M + M A - M B R^{-1} B^T M + Q = 0 \quad (28)$$

$$K = R^{-1} B^T M \quad (29)$$

$$U = -KX \quad (30)$$

این روش بهینه نمودن، برای سیستم‌های فیزیکی مختلط و پیچیده قابل اجرا نمی‌باشد، چرا که معمولاً همه متغیرهای حالت را نمی‌توان محاسبه و اندازه‌گیری کرد. و در عمل سعی می‌گردد به جای اندازه گیری متغیرهای حالت، مستقیماً از متغیرهای خروجی بهره برد.

در طراحی کنترل کننده LQR برای مطالعه رفتار دینامیکی سیستم، روشی ارائه گردیده است که اصطلاحاً کنترل‌کننده مقایسه‌ای نامیده می‌شود [۲۷] - [۲۴]. این روش یک قانون کنترلی با یک فیدبک ثابت خروجی $U = -KY$ را فراهم می‌آورد و باعث جلوگیری از اندازه‌گیری متغیرهای حالت و پیچیدگی‌های کنترل‌کننده دینامیکی مرتبه بالا می‌گردد. این روش می‌تواند به طور خلاصه به صورت زیر توصیف گردد:

$$F = A - B R^{-1} B^T M \quad (31)$$

از آنجایی که ابعاد بردار خروجی Y ، r است، از این رو مقادیر ویژه r و بردارهای ویژه F انتخاب می‌گردد و ماتریس X_r را تشکیل داده می‌شود، به صورتی که ستون‌های ماتریس فوق بردارهای ویژه انتخاب شده باشند.

$$P = X_r (C X_r)^{-1} \quad (32)$$

کنترل مقایسه‌ای آن عبارت خواهد بود با:

$$U = -R^{-1} B^T M P X \quad (33)$$

آنگاه می‌توان معادله (۳۳) را بر حسب خروجی Y محاسبه نمود:

$$U = -KY \quad (34)$$

که در اینجا:

$$K = R^{-1} B^T M X_r (C X_r)^{-1} \quad (35)$$

با مراجعه به مرجع [۲۷]، می‌توان دید که ماتریس حلقه بسته A از کنترل فیدبک خروجی ثابت (۳۴) محاسبه گردیده است و دارای مقادیر ویژه r و بردارهای ویژه یکسان هستند. همانند آنچه از F به دست می‌آید. برای حفظ سادگی و هماهنگی کنترل‌کننده‌ها با یکدیگر در این مقاله، فقط دو سیگنال اندازه‌گیری و دو سیگنال کنترل برای کنترل نوسان متغیرهای شبکه به کار گرفته شده است، $r = m = 2$. در نتیجه کنترل‌کننده مورد استفاده به فرم زیر می‌باشد:

برای مطالعات پایداری سیگنال کوچک، جریان تزریقی (\bar{I}_{kSVC}) و ولتاژ گره k (\bar{V}_k) بیانگر مدل تزریق جریانی SVC می‌باشند، که در صفحه مرجع $d-q$ شبکه تعریف می‌شوند و به صورت معادلات (۲۱) و (۲۲) با دیگر مولفه‌های شبکه کوپل می‌شوند:

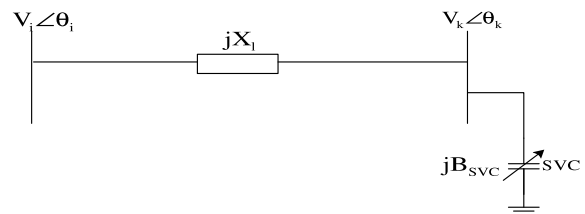
$$I_{jsvc} = I_{kSVC} + j I_{kSVC} Q \quad (21)$$

$$V_k = V_{kD} + j V_{kQ} \quad (22)$$

با جایگذاری معادلات (۲۱) و (۲۲) در (۲۰) معادلات جبری، معادلات مربوط به مدل جریان تزریقی SVC بدین صورت به دست می‌آید:

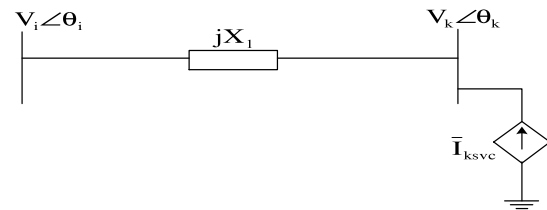
$$I_{kSVC} = B_{svc} \cdot V_{kQ} \quad (23)$$

$$I_{kSVC} = -B_{svc} \cdot V_{kD} \quad (24)$$



شکل (۶): نمایش یک SVC در شبکه

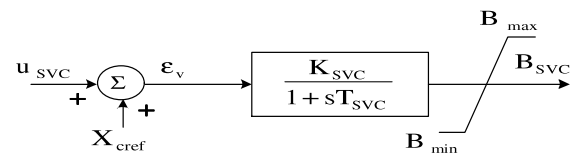
Fig. 6: Representation of a SVC



شکل (۷): مدل جریان تزریقی SVC

Fig. 7: Current injection model for a SVC

شکل (۸) بلوک دیگرام مدل کنترل SVC را برای حالت گذرا و مطالعات پایداری نوسانی سیستم قدرت را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل (۸): بلوک دیگرام کنترلی SVC

Fig. 8: Control block diagram of SVC

۵- طراحی مدل کنترل کننده LQR

از طریق مدل فضای حالت می‌توان به یک سیستم خطی دسترسی پیدا کرد که به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (25)$$

$$Y = CX \quad (26)$$

همچنین می‌توان با توجه به دیاگرام فازوری شکل (۱۳)، و مدل سیستم مورد مطالعه شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به تاثیر تنظیم راکتانس X_C و سوسپتانس B_{SVC} در یک سیستم قدرت دست یافت.

۶- طراحی کنترل کننده ADALINE

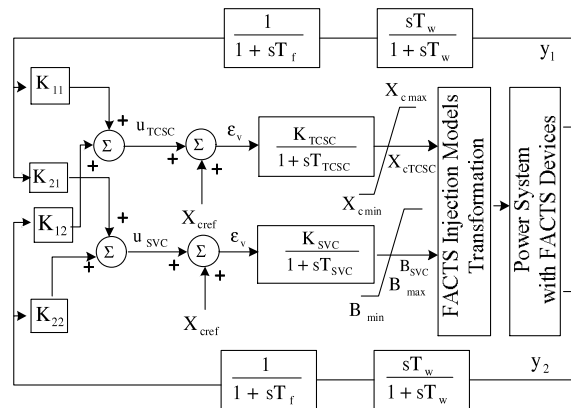
کارکرد شبکه ADALINE بر اساس روش Widrow-Hoff [۲۸]. [۲۹] ارائه و اثبات می‌گردد. اساس روش Widrow-Hoff، به نوبه خود بر پایه الگوریتم آموزش LMS بنیان نهاده شده است. این مدل نشان دهنده یک نمونه کلاسیک از ساده‌ترین سیستم خودآموز هوشمند است که می‌تواند با توجه به مدل سیستم خطی به کار رفته، برای دستیابی به تابع هدف مورد نظر، خود را با سیستم وفق و انطباق دهد [۱۹]، [۳۰].

یکی از مهمترین ویژگی‌های ADALINE توانایی آموزش Online شبکه و از بین رفتن نیاز آموزش شبکه به صورت Offline می‌باشد. اگرچه بیشتر شبکه‌های عصبی توانایی آموزش Online را دارا می‌باشند، لیکن برتری شبکه ADALINE به ساختار ساده و سرعت آن باز می‌گردد. یکی دیگر از مهمترین مزیت‌های این تکنیک امکان دستیابی به یک درک سیستمی با توجه به وزن‌های شبکه ADALINE می‌باشد که این قابلیت در سایر شبکه‌های عصبی یافت نمی‌گردد [۲۰]، [۳۰].

به طور مشخص در این مقاله، شبکه ADALINE برای کنترل درجه جبران‌سازی سری (K_C)، مربوط به TCSC و همچنین کنترل ادمیتانس (B_{SVC})، مربوط به SVC به کار رفته است. پارامترهای کنترل شده توسط شبکه ADALINE در واقع کنترل زاویه آتش ترستورهای موجود در ساختار ادوات FACTS یاد شده را، برعهده دارند تا در هنگام بروز اغتشاشات بزرگ در سیستم با تغییر K_C ، ($d\delta/dt > 0$ حداکثر - $d\delta/dt < 0$ حداقل)، توان منتقل شده در خط تغییر یافته و با تغییر در B_{SVC} در جبران ساز موازی که در نهایت به تغییر ولتاژ محل نصب SVC در خط انتقال منجر می‌گردد، بتوان حد پایداری گذرا و میرایی سیستم را افزایش داد. شبکه ADALINE با توجه به بهره‌گیری از ویژگی سرعت بالا در فرآیند آموزش و دریافت سیگنال‌های متنوع از قسمت‌های مختلف و انطباق خود با سیستم قدرت امکان بهره‌گیری از یک کنترل کننده هماهنگ و مناسب را ایجاد می‌نماید، تا بتوان از تمام ویژگی‌های TCSC و SVC در سیستم برای افزایش پایداری گذرا، افزایش حد پایداری ولتاژ، افزایش توان قابل انتقال و میرای نوسانات سیستم بهره گرفت. ساختار مدل شبکه ADALINE در شکل (۱۰) نشان داده شده است. وزن‌های شبکه آدالاین با استفاده از الگوریتم آموزش و تکرار LMS برای دستیابی به می‌نیم خطا ($e(k)$) در شبکه آموزش می‌بینند. بنابراین می‌توان آموزش شبکه ADALINE را بر اساس الگوریتم LMS به صورت معادلات (۲۵) و (۲۶) بیان نمود [۲۸]، [۲۹]:

$$\begin{bmatrix} u_{TCSC} \\ u_{SVC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (۲۶)$$

متغیرهای کنترلی u_{TCSC} و u_{SVC} که در حقیقت سیگنال‌های ورودی به TCSC و SVC می‌باشند به کمک ماتریس ضرائب K به دست آمده از معادله ریگانی و سیگنال‌های اندازه‌گیری شده y_1 و y_2 به دست می‌آیند. سیگنال‌های اندازه‌گیری شده انتخابی برای y_1 و y_2 به ترتیب عبارتند از: نوسانات پخش بار توان حقیقی (ΔP_{1-3}) در سرتاسر خطی که TCSC در آن نصب گردیده است و نوسانات ولتاژ شینی (ΔV_3) که در آن SVC نصب گردیده است. بلوک دیاگرام ساختار کنترلی LQR در شکل (۹) ارائه گردیده است. این کنترل کننده شامل تعدادی بلوک به عنوان فیلتر بالا گذر، با ثابت زمانی $T_w = 5^s$ می‌باشد، که مقدار آن به حد کافی بزرگ انتخاب شده است تا به سیگنال‌های مرتبط با نوسانات اجازه عبور بدون تغییر را دهد و همچنین شامل یک فیلتر ساده با ثابت زمانی $T_f = 0.015^s$ برای از بین بردن فعل و انفعالات در فرکانس‌های بالا می‌باشد [۲۲]. سایر پارامترهای کنترل کننده LQR به قرار زیر است:



شکل (۹): کنترل کننده LQR

Fig. 9: LQR controller

با تنظیم راکتانس X_C مربوط به TCSC و سوسپتانس B_{SVC} مربوط به SVC تحت کنترل هماهنگ TCSC و SVC (برگرفته از معادلات (۱۰)، (۱۱) و (۲۰) مطابق با جریان‌های تزریقی در باس‌های ترمینال)، شدت ولتاژ و زاویه فاز سیستم، می‌تواند به وسیله تنظیمات ادوات FACTS تنظیم گردد.

بر اساس این سیستم، یک مدل فضای حالت نتیجه می‌شود. ابتدا یک تبدیل حالت برای درست کردن ماتریس C به فرم $[I_{rxr} \ 0]$ به کار می‌رود و سپس به همان روشی که توضیح آن در قسمت (۵) داده شده برای طراحی کنترل کننده LQR به کار گرفته می‌شود. ماتریس Q و ماتریس R در (۲۰) بترتیب به صورت $100I_{nxn}$ و $I_{m \times m}$ انتخاب می‌شوند. در نهایت ماتریس کنترل میرایی K به صورت زیر در می‌آید:

$$K = \begin{bmatrix} -59.5026 & 40.1890 \\ -5.3470 & -0.1034 \end{bmatrix}$$

Table (1): Learning rate parameters

جدول (۱): پارامترهای نرخ آموزش

η_i	η_f	t_{max} s
0.005	10^{-5}	10

در این مقاله ساختار شبکه عصبی برای کنترل ادوات SVC و TCSC به گونه‌ای است که از ۲ نرون ADALINE در شبکه استفاده شده است. ورودی‌های این ۲ نرون عبارتند از: $\Delta P_{1-3}, E_q, E_d, I_q, I_d, P_e$. به گونه‌ای که از ΔV_3 به توجیه به سیستم قدرت انتخاب شده‌اند. در هنگام بروز اغتشاش همان طور که از معادلات (۲۵) و (۲۶) مشاهده می‌شود سیستم اقدام به تولید وزن‌های جدید کرده و این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که خطای $e(k)$ برابر می‌نیم مقدار خود گردد. وزن‌های جدید تولید شده در هنگام بروز اغتشاش با ایجاد تغییرات در محدوده کارکرد SVC و TCSC، منجر به حفظ پایداری گذرا و افزایش میرایی در سیستم قدرت می‌شوند. در شکل (۱۰) چگونگی به کارگیری شبکه عصبی را در کنترل ادوات FACTS نشان داده شده است.

$$W(k+1) = W(k) + \eta e(k) X^T(k) \quad (25)$$

$$b(k+1) = b(k) + 2\alpha e(k) \quad (26)$$

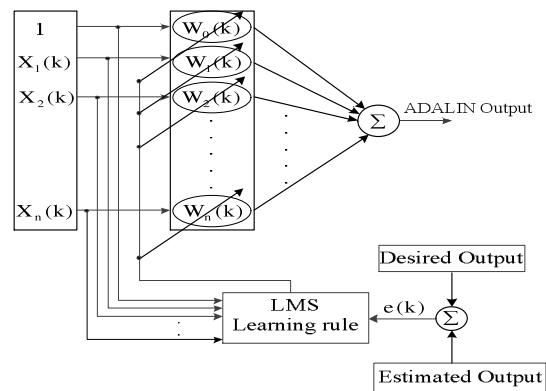
که η نرخ آموزش شبکه ADALINE می‌باشد.

برای سرعت بخشیدن به همگرایی و دریافت نتایج مناسب و بهینه، نرخ آموزش η باید متغیر باشد. η در ابتدای آموزش از نظر اندازه در بالاترین سطح خود قرار دارد ولی رفته رفته با آموزش وزن‌های شبکه این مقدار به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود.

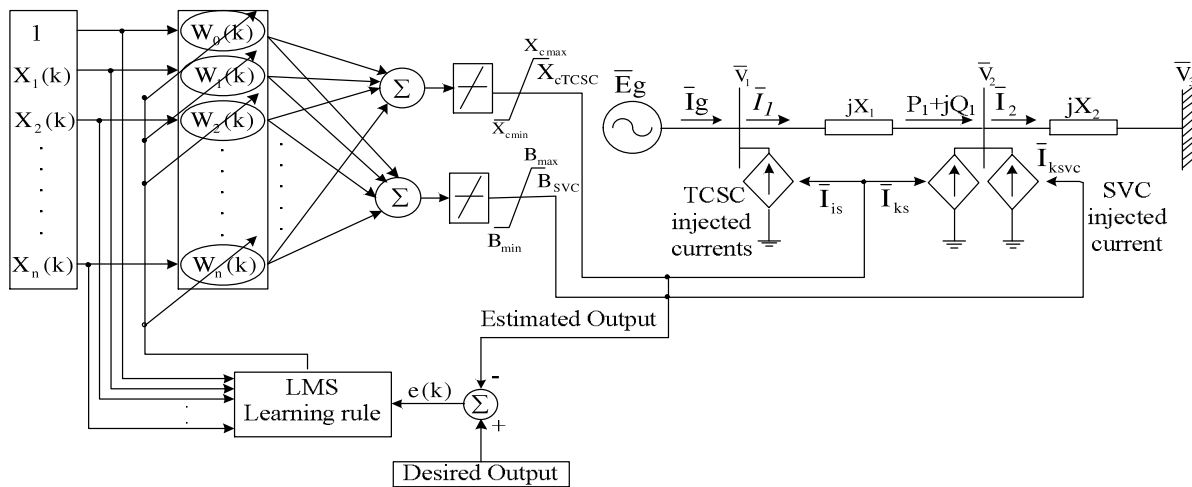
تغییرات η را می‌توان با توجه به رابطه (۲۷) بیان نمود:

$$\eta = \eta_i \left(\frac{\eta_f}{\eta_i} \right)^{t/t_{max}} \quad (27)$$

که η_i و η_f به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی نرخ آموزش و t_{max} حد اکثر زمان آموزش است که در جدول (۱) مقادیر آن ارائه شده است.



شکل (۱۰): ساختار شبکه ADALINE
Fig. 10: Configuration of ADALINE network

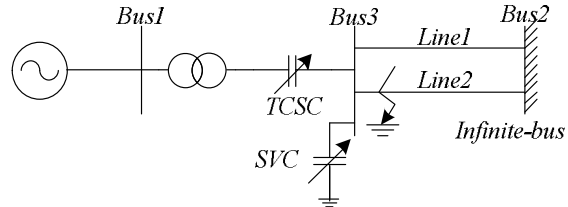


شکل (۱۱): مدار معادل سیستم و نحوه عملکرد شبکه ADALINE در سیستم قدرت

Fig. 11: Schematic diagram of Power network and controller

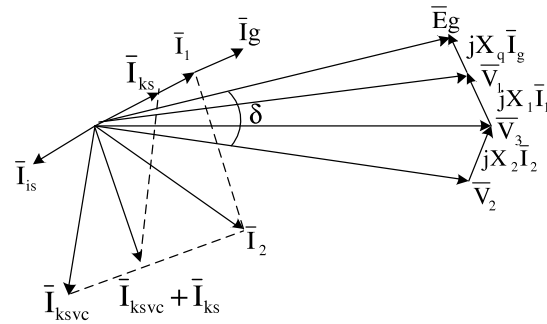
۶- سیستم مورد مطالعه

برای آزمایش و یافتن تاثیر و کارایی کنترل کننده هماهنگ ارائه شده، مدل ساده‌ای از سیستم قدرت پیشنهاد می‌گردد. محل قرارگیری TCSC و SVC در شکل (۱۲) مشخص شده است. همچنین از تاثیر مقاومت‌های سری و تاثیرات خازنی خط انتقال صرف نظر شده است. مدار معادل سیستم و نحوه به کارگیری کنترل کننده LQR در شکل (۹) و نحوه به کارگیری شبکه ADALINE در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): یک سیستم تک ماشینه متصل به باس بی‌نهایت همراه با SVC و TCSC

Fig. 12: A single-machine infinite-bus system with TCSC and SVC.



شکل (۱۳): دیاگرام فازوری سیستم همراه با SVC و TCSC

Fig. 13: Phasor diagram of the system with TCSC and SVC

۷- شبیه سازی

برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده طراحی شده بر اساس شبکه ADALINE، پاسخ سیستم از حیث تغییرات زاویه بار، توان انتقالی و ولتاژ شین با آنچه که توسط یک کنترل کننده طراحی شده بر اساس LQR به دست آمده، مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. مقایسه و نتایج شبیه‌سازی بر اساس مدل غیرخطی شبکه و برای دو نوع اختلال انجام شده است:

الف- اختلال کوچک

شبیه‌سازی سیستم به منظور بررسی پایداری آن در قبال اغتشاش کوچک در دو شکل متفاوت بررسی شده است.

الف) در این حالت فرض شده که بر اساس یک اغتشاش خارجی، خط ۲ (شکل ۱۲) در لحظه $t = 0.1s$ قطع می‌شود. جهت بررسی دقیق‌تر، این حالت برای دو توان انتقالی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱) توان انتقالی $0.9pu$ در نظر گرفته می‌شود.

۲) توان انتقالی $1.1pu$ در نظر گرفته می‌شود.

ب) بدون قطع خط، توان انتقالی ماشین در لحظه $t=2s$ تغییر می‌یابد

۱) افزایش توان انتقالی ژنراتور سنکرون از $P=1pu$ به $P=1.25pu$.

۲) افزایش توان انتقالی ژنراتور سنکرون از $P=1pu$ به $P=1.4pu$.

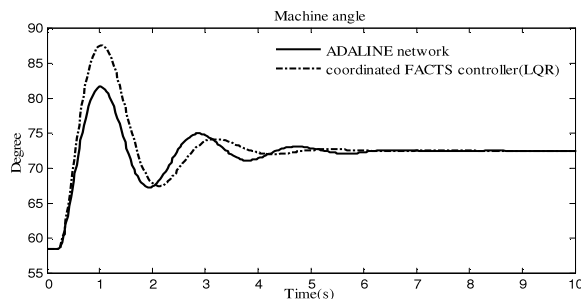
ب- اختلال بزرگ

یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن در لحظه $t = 0.1s$ بر روی وسط خط انتقال ۲ واقع شده و به مدت $0.1s$ به طول می‌انجامد و سپس کلیدهای فشارقوی، خط انتقال مذکور را قطع می‌نمایند.

۷-۱- آنالیز اختلال کوچک

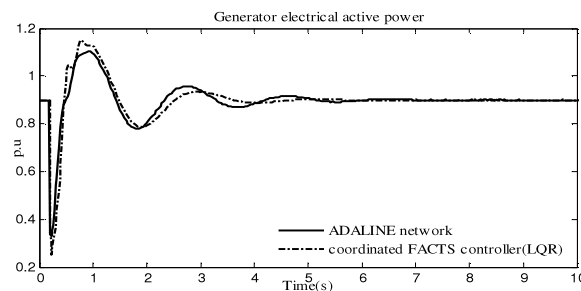
حالت الف-۱: توان انتقالی $P=0.9pu$

شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) نتایج شبیه‌سازی را برای حالتی که کنترل کننده ADALINE در مدار قرار دارد را در مقایسه با حالتی که کنترل کننده LQR در مدار باشد در هنگام بروز اختلال کوچک نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) به ترتیب واکنش دینامیکی زاویه روتور ماشین، توان اکتیو خروجی ماشین و ولتاژ ترمینال را به اختلال کوچک نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی حاکی بر این است که کنترل کننده ADALINE، عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده LQR دارا می‌باشد. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب واکنش‌های X_C خروجی (TCSC) و B_{SVC} خروجی (SVC) را نسبت به اختلال کوچک نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): زاویه ماشین بازای قطع خط در توان $0.9pu$

Fig. 14: Variation of load angle due cut of line for $p_e=0.9 p.u$

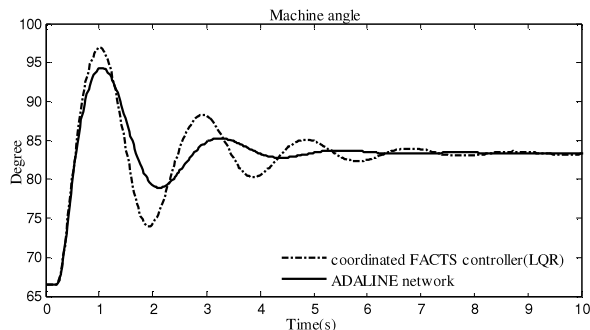


شکل (۱۵): توان انتقالی ماشین بازای قطع خط در توان $0.9pu$

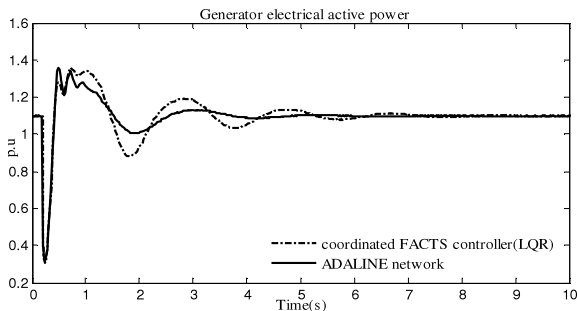
Fig. 15: Variation of electric power due cut of line for $p_e=0.9 p.u$

حالت الف ۲- توان انتقالی $P=1.1pu$

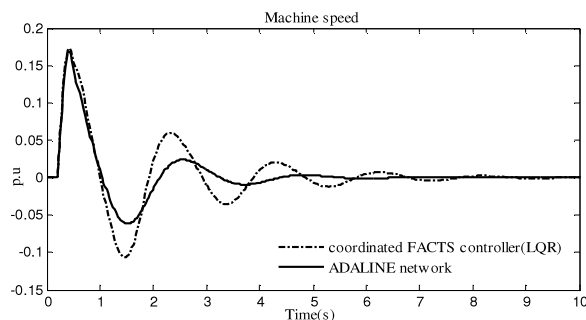
شکل‌های (۲۰) تا (۲۵) نتایج شبیه‌سازی را برای حالتی که توان انتقالی به $P=1.1pu$ افزایش یافته را نشان می‌دهد. شکل‌های (۲۰) تا (۲۳) به ترتیب واکنش دینامیکی زاویه روتور ماشین، توان اکتیو خروجی ماشین، سرعت ماشین و ولتاژ ترمینال را به این اختلال نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی حاکی بر این است که کنترل کننده ADALINE، در این حالت نیز توانسته عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده LQR ارائه کند و افزایش میرایی نوسانات سیستم گردد. شکل‌های (۲۴) و (۲۵) به ترتیب واکنش‌های X_C خروجی (TCSC) و B_{SVC} خروجی (SVC) را نسبت به اختلال کوچک نشان می‌دهد.



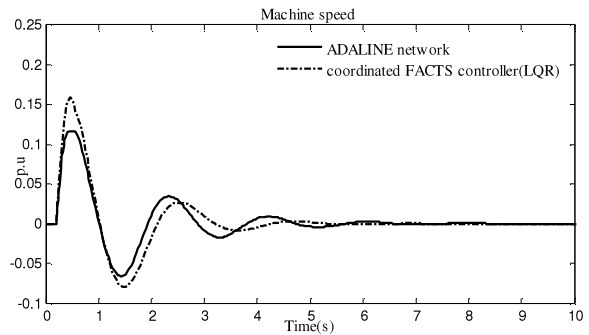
شکل (۲۰): زاویه ماشین بازای قطع خط در توان $1.1pu$
Fig. 20: Variation of load angle due cut of line for $p_e=1.1 pu$



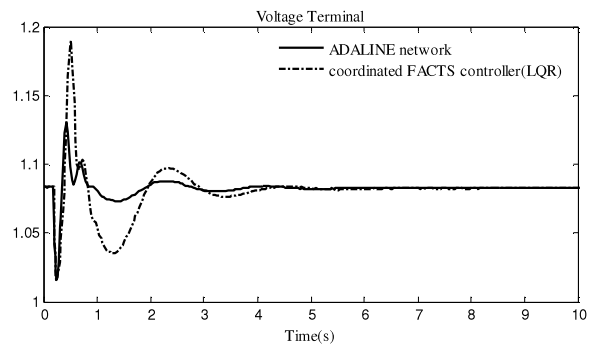
شکل (۲۱): توان انتقالی ماشین بازای قطع خط در توان $1.1pu$
Fig. 21: Variation of electric power due cut of line for $p_e=1.1 pu$



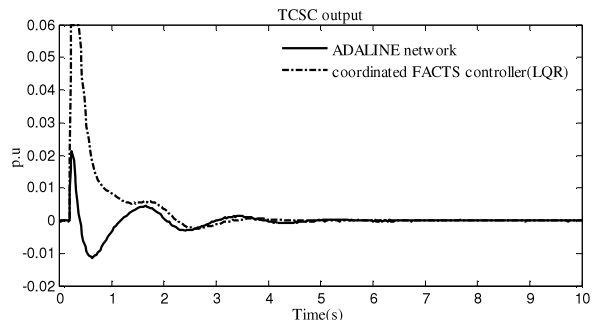
شکل (۲۲): سرعت ماشین بازای قطع خط در توان $1.1pu$
Fig. 22: Variation of rotor speed due cut of line for $p_e=1.1 pu$



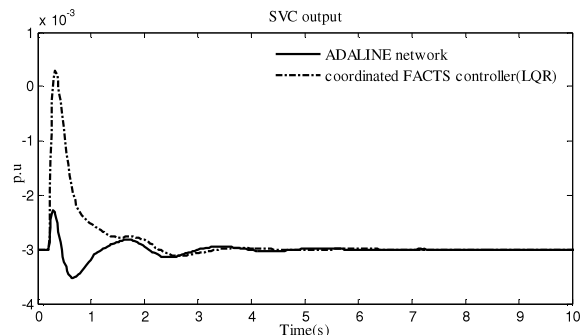
شکل (۱۶): سرعت ماشین بازای قطع خط در توان $0.9pu$
Fig. 16: Variation of rotor speed due cut of line for $p_e=0.9 pu$



شکل (۱۷): ولتاژ ترمینال بازای قطع خط در توان $0.9pu$
Fig. 17: Variation of terminal voltage due cut of line for $p_e=0.9 pu$

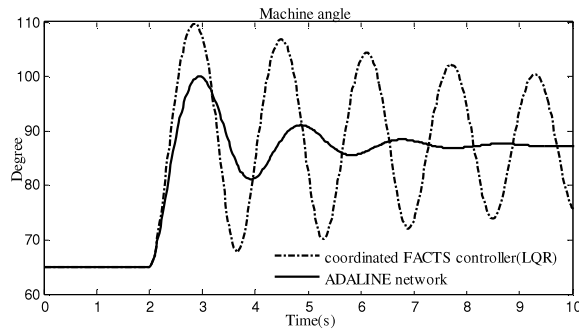


شکل (۱۸): خروجی TCSC بازای قطع خط در توان $0.9pu$
Fig. 18: Output of TCSC due cut of line for $p_e=0.9 pu$

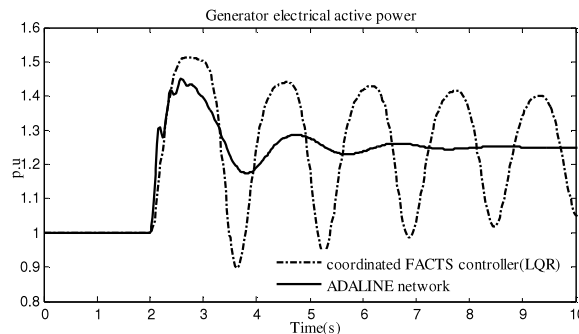


شکل (۱۹): خروجی SVC بازای قطع خط در توان $0.9pu$
Fig. 19: Output of SVC due cut of line for $p_e=0.9 pu$

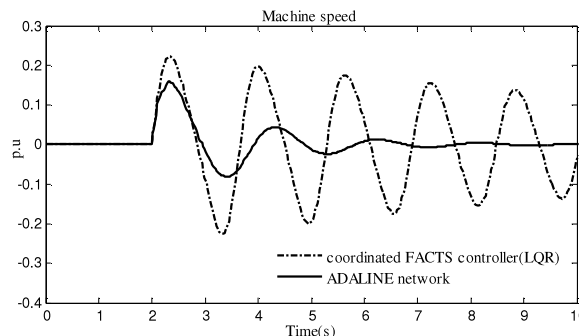
کنترل کننده LQR نتوانسته با این تغییر وضعیت کنترل خوبی از خود نشان دهد و سیستم دچار نوسان شدیدی گردیده است. در این اختلال به خوبی می‌توان به مزایای کنترل کننده‌های هوشمند نسبت به سایر کنترل کننده‌ها که همان افزایش محدوده نقطه کار و انعطاف پذیری این کنترل کننده‌ها است، دست یافت.



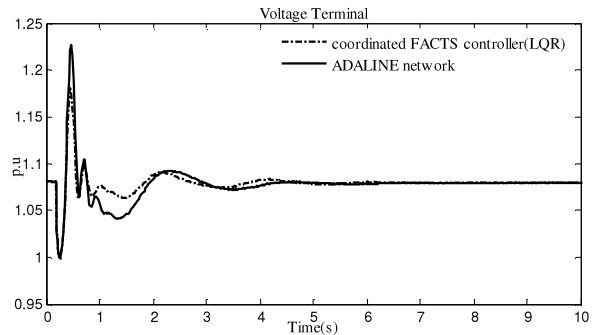
شکل (۲۶): زاویه ماشین بازای ۲۵ درصد افزایش بار
Fig. 26: Variation of load angle due to +25% variation of electric load



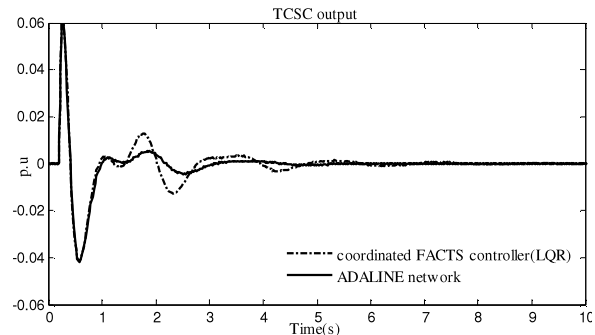
شکل (۲۷): توان انتقالی ماشین بازای ۲۵ درصد افزایش بار
Fig. 27: Variation of electric power due to +25% variation of electric load



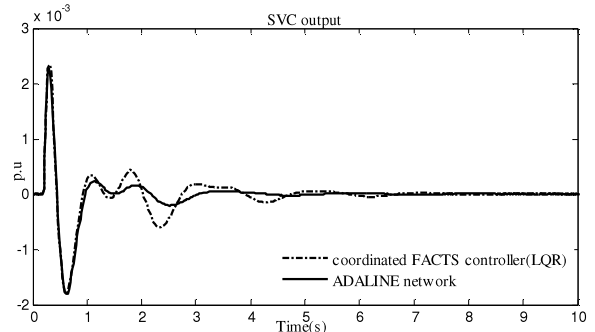
شکل (۲۸): سرعت ماشین بازای ۲۵ درصد افزایش بار
Fig. 28: Variation of rotor speed due to +25% variation of electric load



شکل (۲۳): ولتاژ ترمینال بازای قطع خط در توان ۱.۱ p.u.
Fig. 23: Variation of terminal voltage due cut of line for $p_e=1.1$ p.u



شکل (۲۴): خروجی TCSC بازای قطع خط در توان ۱.۱ p.u.
Fig. 24: Output of TCSC due cut of line for $p_e=1.1$ p.u

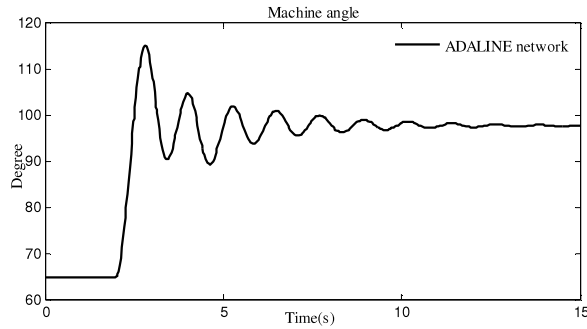


شکل (۲۵): خروجی SVC بازای قطع خط در توان ۱.۱ p.u.
Fig. 25: Output of SVC due cut of line for $p_e=1.1$ p.u

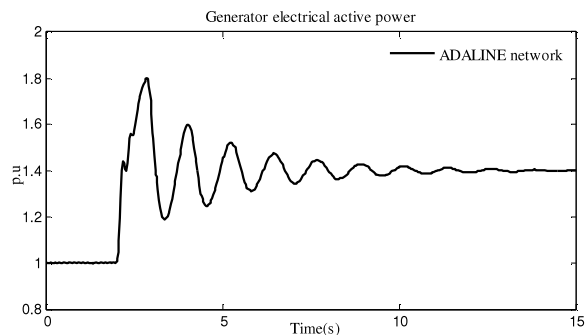
حالت ب - ۱: افزایش توان انتقالی از $P=1pu$ به $P=1.25pu$

برای درک عملکرد کنترل ADALINE نسبت به LQR در شرایط افزایش توان انتقالی، این فرض بدین صورت مطرح گردید که به علت تقاضای بار، توان انتقالی ژنراتور سنکرون ۲۵٪ افزایش یابد. همان طور که از شکل‌های (۲۶) تا (۳۱) مشاهده می‌گردد کنترل هماهنگ شبکه ADALINE با این تغییر وضعیت توانسته خود را با شبکه تطبیق و ضرائب خروجی خود را به صورت ضربه‌ای کنترل نماید. این نوع کنترل عموماً به عنوان موثرترین روش کنترلی شناخته می‌شود، به خصوص اگر نوسانات بزرگی به وجود آمده باشد. به موازات آن

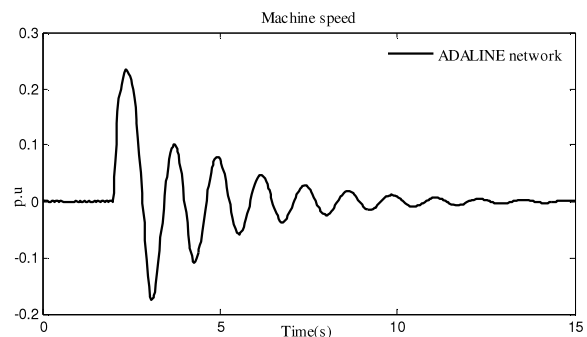
کنترلی شناخته می‌شود، و با مقایسه شکل‌های (۲۶) تا (۳۱) با شکل‌های (۳۲) تا (۳۷) به قدرت، سرعت پاسخگویی و پردازش اطلاعات و منطبق شدن این کنترل‌کننده با سیستم قدرت برای حفظ پایداری سیستم، بهبود میرایی سیستم و افزایش توان انتقالی می‌توان دست یافت.



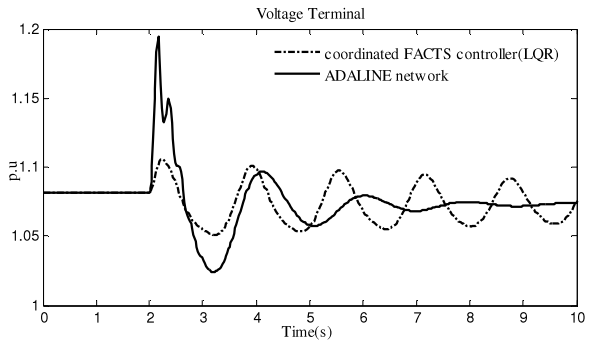
شکل (۳۲): زاویه ماشین بازای ۴۰ درصد افزایش بار
Fig. 32: Variation of load angle due to +40% variation of electric load



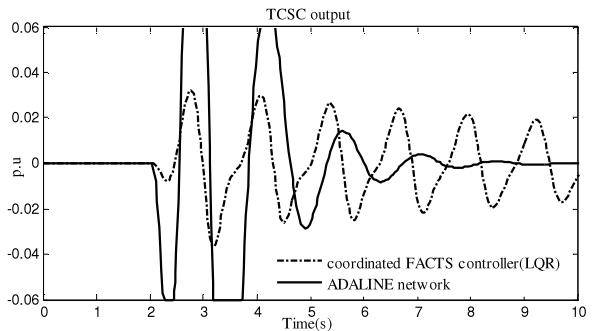
شکل (۳۳): توان انتقالی ماشین بازای ۴۰ درصد افزایش بار
Fig. 33: Variation of power electric due to +40% variation of electric load



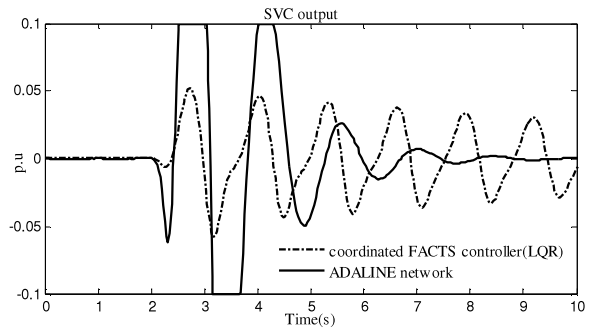
شکل (۳۴): سرعت ماشین بازای ۴۰ درصد افزایش بار
Fig. 34: Variation of rotor speed due to +40% variation of electric load



شکل (۲۹): ولتاژ ترمینال بازای ۲۵ درصد افزایش بار
Fig. 29: Variation of terminal voltage due to +25% variation of electric load



شکل (۳۰): خروجی TCSC بازای ۲۵ درصد افزایش بار
Fig. 30: Output of TCSC due to +25% variation of electric load



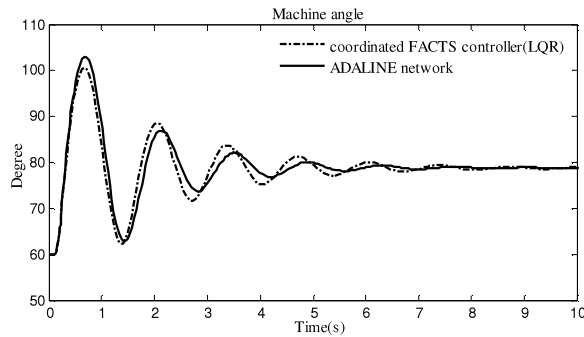
شکل (۳۱): خروجی SVC بازای ۲۵ درصد افزایش بار
Fig. 31: Output of SVC due to +25% variation of electric load

حالت ب - ۲: افزایش توان انتقالی از $P=1pu$ به $P=1.4pu$.

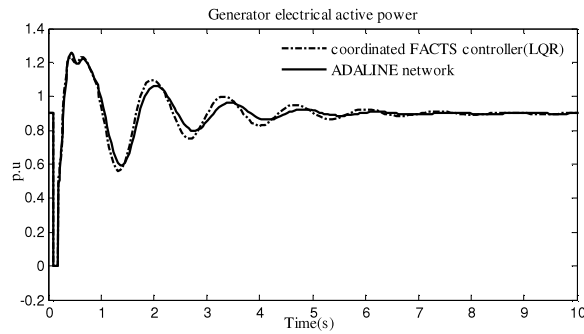
برای آشنایی بیشتر با کیفیت بهتر عملکرد کنترل کننده شبکه عصبی ADALINE نسبت به LQR و در شرایط افزایش توان انتقالی، درخواست بار به 40 درصد افزایش داده خواهد شد. پایداری سیستم کنترل طراحی شده قابل توجه می‌باشد.

همانطور که از شکل‌های (۳۲) تا (۳۷) مشاهده می‌گردد کنترل هماهنگ شبکه ADALINE با این تغییر وضعیت توانسته خود را با شبکه تطبیق و ضرائب خروجی خود را به صورت ضربه‌ای کنترل نماید. همانطور که گفته شد، این نوع کنترل عموماً به عنوان موثرترین روش

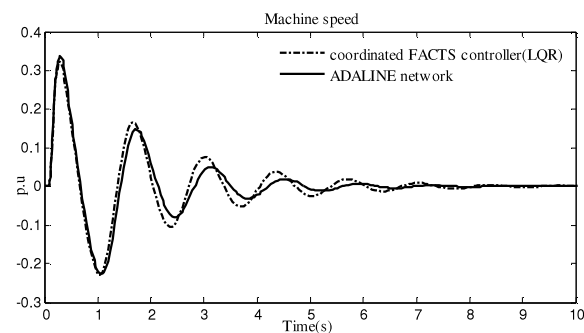
واکنش دینامیکی زاویه روتور ماشین، توان اکتیو خروجی ماشین، سرعت ماشین و ولتاژ ترمینال را به این اختلال نشان می‌دهد. با بررسی نتایج شبیه‌سازی می‌توان به عملکرد بهتر کنترل‌کننده ADALINE، نسبت به کنترل‌کننده LQR دست یافت. شکل‌های (۴۲) و (۴۳) به ترتیب واکنش‌های X_C خروجی (TCSC) و B_{SVC} خروجی (SVC) را نسبت به اختلال کوچک نشان می‌دهد.



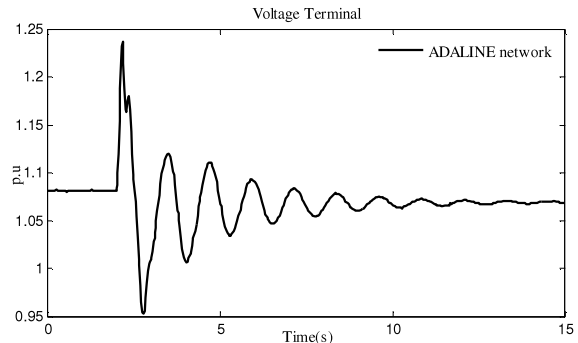
شکل (۳۸): زاویه ماشین بازاى بروز اتصال کوتاه
Fig. 38: Variation of load angle due to a transient short circuit



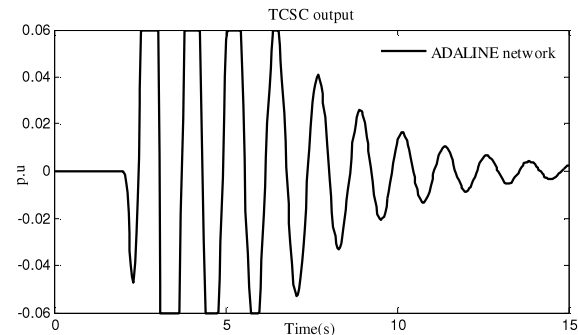
شکل (۳۹): توان انتقالی ماشین
Fig. 39: Variation of electric power due to a transient short circuit



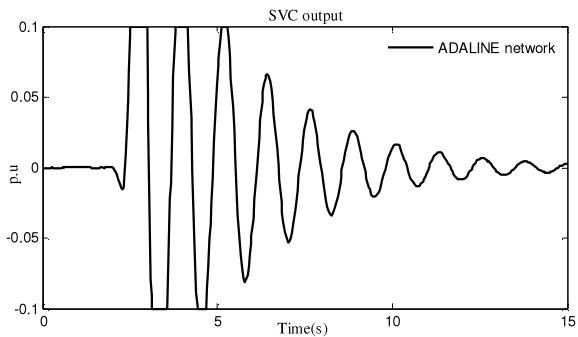
شکل (۴۰): سرعت ماشین بازاى بروز اتصال کوتاه
Fig. 40: Variation of rotor speed due to a transient short circuit



شکل (۳۵): ولتاژ ترمینال بازاى ۴۰ درصد افزایش بار
Fig. 35: Variation of terminal voltage due to +40% variation of electric load



شکل (۳۶): خروجی TCSC بازاى ۴۰ درصد افزایش بار
Fig. 36: Output of TCSC due to +40% variation of electric load

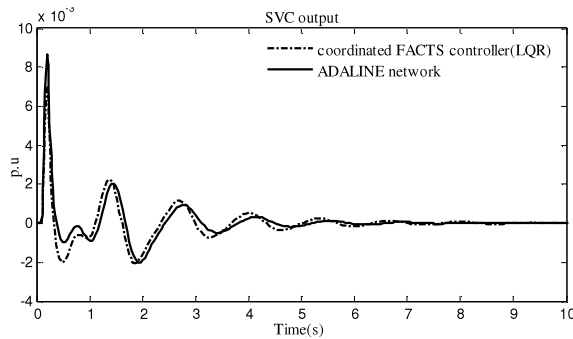


شکل (۳۷): خروجی SVC بازاى ۴۰ درصد افزایش بار
Fig. 37: Output of SVC due to +40% variation of electric load

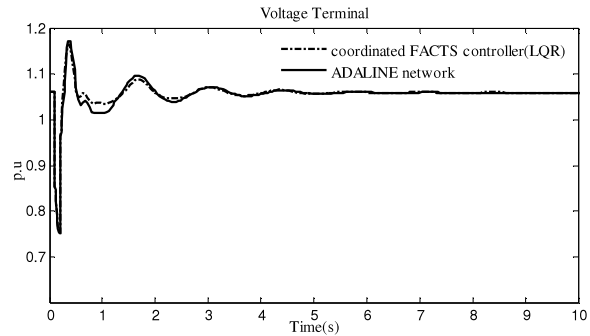
۷-۲- آنالیز اختلال بزرگ

یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن در لحظه $t = 0.1s$ بر روی خط ۲ واقع شده و به مدت $0.1s$ به طول می‌انجامد و سپس کلیدهای فشارقوی، خط انتقال مذکور را قطع می‌نمایند.

توان انتقالی در این حالت همان $0.9pu$ فرض شده است شکل‌های (۳۸) تا (۴۳) نتایج شبیه‌سازی را برای وضعیتی که کنترل‌کننده شبکه ADALINE در مقایسه با کنترل‌کننده LQR در هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز متقارن نشان می‌دهد. شکل‌های (۳۸) تا (۴۱) به ترتیب



شکل (۴۳): خروجی SVC بازای بروز اتصال کوتاه
Fig. 43: Output of SVC due to a transient short circuit

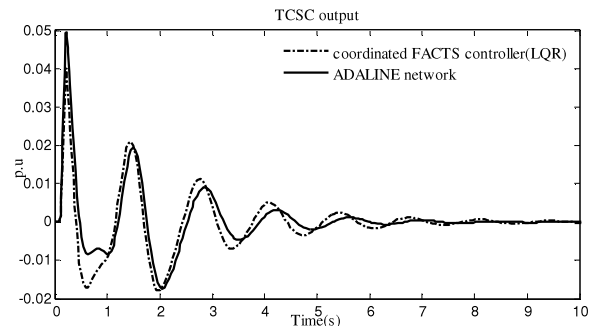


شکل (۴۱): ولتاژ ترمینال بازای بروز اتصال کوتاه
Fig. 41: Variation of terminal voltage due to a transient short circuit

۸- نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده ADALINE برای کنترل هماهنگ TCSC و SVC، نسبت به کنترل کننده LQR می‌تواند نوسانات سیستم قدرت را که ناشی از اغتشاشات کوچک یا بزرگ می‌باشد، به طور موثرتری بهبود بخشد. همچنین این کنترل کننده می‌تواند با توجه به خصوصیات ذاتی خود از قبیل سرعت پاسخگویی، انطباق با سیستم و سادگی، باعث انعطاف پذیری سیستم نسبت به تغییر نقطه کار شده و باعث افزایش توان انتقالی سیستم می‌گردد. و یا به عبارت دیگر می‌توان گفت که کنترل کننده طراحی شده مقاومت بیشتری را نسبت به تغییرات نقطه کار شبکه نسبت به کنترل کننده LQR از خود بروز می‌دهد.

جهت تحقیقات بعدی، کنترل کننده ADALINE را برای کنترل هماهنگ ادوات FACTS نسل دوم (SSSC) و SVC، در یک سیستم چهار ماشینه مورد بررسی قرار خواهد گرفت که در حال حاضر مطالعات آن در حال انجام است.



شکل (۴۲): خروجی TCSC بازای بروز اتصال کوتاه
Fig. 42: Output of TCSC due to a transient short circuit

مراجع

- [1] J.J. Sanchez-Gasca, "Coordinated control of two FACTS devices for damping inter area Oscillations", *IEEE Trans. on Pow. Sys.*, Vol.13, No.2, pp.428-434, May 1998.
- [2] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale, "A single-phase DG generation unit with shunt active power filter capability by adaptive neural filtering", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.55, No.5, pp.2093-2110, May 2008.
- [3] J.A. Barrena, L. Marroyo, M.R. Vidal, J.R.T. Apraiz, "Individual voltage balancing strategy for PWM cascaded H-bridge converterbased STATCOM", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.55, No.1, pp.21-29, Feb. 2008.
- [4] M.H. Abdel-Rahman, F.M.H. Youssef, A.A. Saber, "New static var compensator control strategy and coordination with under-load tap changer", *IEEE Trans. Pow. Del.*, Vol.21, No.3, pp.1630-1635, Jul. 2006.
- [5] B.-S. Chen and Y.-Y. Hsu, "A minimal harmonic controller for a STATCOM", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.55, No.2, pp.655-664, Feb. 2008.
- [6] R.S. Herrera, P. Salmern, H. Kim, "Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches, assessment, and experimental results", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.55, No.1, pp.184-196, Feb. 2008.
- [7] N. Zhu, S. Vadari, D. Hwang, "Analysis of a static VAr compensator using the dispatcher training simulator", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, Vol.10, No.3, pp.1234-1242, Aug. 1995.
- [8] E.N. Lerch, D. Povh, L. Xu, "Advanced SVC control for damping power system oscillations", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, Vol.6, No.2, pp.524-535, May 1991.
- [9] T. Ohyama, K. Yamashita, T. Maeda, H. Suzuki, S. Mine, "Effective application of static var compensators to damp oscillations", *IEEE Trans. Pow. App. Sys.*, Vol.PAS-104, No.6, pp.1405-1410, Jun. 1985.
- [10] J. Zhang, J.Y. Wen, S.J. Cheng, J. Ma, "A novel SVC allocation method for power system voltage stability enhancement by normal forms of diffeomorphism", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, Vol.22, No.4, pp.1819-1825, Nov. 2007.

- [11] M. Wien, H. Schwarz, T. Oelbaum, "Performance analysis of SVC", *IEEE Trans. Circ. Sys. Video Technol.*, Vol.17, No.9, pp.1194–1203, Sep. 2007.
- [12] S. Panda, N.P. Padhy, "Power system with PSS and FACTS controller: Modeling, simulation and simultaneous tuning employing genetic algorithm", *Inte. Jou. of Elec., Comp., and Sys. Eng.*, pp.9-18, 2007.
- [13] J. Paserba, N. Miller, E. Larsen, R. Piwko, "A thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, Vol.10, No.3, pp.1471–1478, Nov. 1995.
- [14] C.R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, H. Ambriz-Perez, "A thyristor controlled series compensator model for the power flow solution of practical power networks", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, Vol.9, No.15, pp.58–64, Feb. 2000
- [15] Q. Ai, Y. Zhou, W. Xu, "ADALINE and its application in power quality disturbances detection and frequency tracking", *Elect. Pow. Sys. Res.*, Vol.77, No.5–6, pp.462–469, 2007.
- [16] P. Dash, A. Liew, D. Swain, B. Mishra, "Fast tracking of transient power system signals using fuzzy LMS algorithm", *Int. J. Electr. Pow. Ene. Sys.*, Vol.20, No.8, pp.555–561, 1998.
- [17] O. Karacasu, M.H. Hocaoglu, "An Adaline based arcing fault detection algorithm for single-pole autoreclosers", *Electr. Pow. Sys. Res.*, Vol.81, No.2, pp.367–376, 2011.
- [18] D. Flieller, D. Ould Abdeslam, P. Wira, J. Merckl'e, "Distortions identification and compensation based on artificial neural networks using symmetrical components of the voltages and the currents", *Elect. Pow. Sys. Res.*, Vol.79, No.7, pp.1145–1154, 2009.
- [19] D. Ould Abdeslam, P. Wira, J. Merckl'e, D. Flieller, Y.A. Chapuis, "A unified artificial neural network architecture for active power filters", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.54, No.1, pp.61–76, Feb. 2007.
- [20] T.K. Abdel-Galil, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, "Power quality event detection using Adaline", *Electr. Pow. Sys. Res.*, Vol.64, No.2, pp.137–144, Feb. 2003.
- [21] K.R. Padiyar, "Power system dynamics stability and control, BS publications", 2nd Edition, Hyderabad, India, 2002.
- [22] S.K. Tso, J. Liang, Q.Y. Zeng, K.L. Lo, X.X. Zhou, "Coordination of TCSC and SVC for stability improvement of power systems", *Proc. of the IEE/ICAPSCOM Inte. Conf. on Adv. in Pow. Sys. Cont., Operation and Management, Hong Kong*, pp.371-376, Nov. 1997.
- [23] E.V. Larsen, J.H. Chow, "Advanced SVC control for damping power system oscillations", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, Vol.6, No.2, pp.524–535, May 1991.
- [24] W.E. Hopkins, J. Medanic, W.R. Perkins, "Output feedback pole placement in the design of suboptimal linear quadratic regulators", *Inter. Jou. of Cont.*, Vol.34, pp.593-612, 1981.
- [25] J. Medanic, Z. Uskokovic, "The design of optimal output regulators for linear multivariable systems with constant disturbances", *Inte. Jou. of Cont.*, Vol.37, pp.809-830, 1983.
- [26] J. Medanic, Z. Uskokovic, "Design of decentralized static and low-order dynamic output regulators for large scale liner systems", *Conf. on Deci. and Cont.*, Vol.22, No.1, pp.521–526, Dec. 1983.
- [27] D. Arnautovic, J. Medanic, "Design of decentralized multivariable excitation controller in multimachine power systems by projective controls", *IEEE Trans. on Ener. Conv.*, Vol.EC-2, No.4, pp.598-604, 1987.
- [28] B. Widrow, M. Kamenetsky, "Statistical efficiency of adaptive algorithms", *Neural Netw.*, Vol.16, No.5–6, pp.735–744, Jun. 2003.
- [29] S. Haykin, "Neural networks: A comprehensive foundation", Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall International, 1999.
- [30] Z.Q. Wang, M.T. Manry, J.L. Schiano, "LMS learning algorithms: Misconceptions and new results on convergence", *IEEE Trans. Neural Net.*, Vol.11, No.1, pp.47–56, Jan. 2000.

