

کنترل بهینه قدرت راکتیو با استفاده از کمپانزاتورهای VAR استاتیکی

غلامحسین خاندان

رسول کنارنگی

شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان

گروه مهندسی برق - دانشگاه تبریز

چکیده:

در این مقاله روشی برای محاسبه قدرت راکتیو و تعیین زاویه آتش کمپانزاتورهای VAR استاتیکی (SVC) در «زمان واقعی»^(۱) جهت استفاده در شبکه‌های الکتریکی ارائه می‌گردد. در این روش، بهینه‌سازی با کمینه نمودن تلفات قدرت اکتیو خط صورت می‌گیرد. بعد از نصب کمپانزاتور بهینه، در تمامی شرایط جریانهای خط به صورت سه فاز متعادل درآمده و ضریب قدرت برابر واحد می‌شود. برای ترکیبهای مختلف SVCها، فرمولهای تعیین زاویه آتش ترستورها ارائه می‌گردد. برای بدست آوردن داده‌ها در زمان واقعی از تبدیل فوریه گسسته (DFT) استفاده شده است. کارآئی روش ارائه شده توسط یک مثال عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

شرح مقاله :

کنترل قدرت راکتیو جهت اصلاح ضریب توان، متعادل نمودن جریانهای خط، تنظیم ولتاژهای انتهای خط، میرایی نوسانات قدرت و بهبود پایداری شبکه‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [2,1].

به خاطر تغییرات مصرف انرژی روزانه از کمترین تا بیشترین مقدار در سیستمهای الکتریکی، تغییر پیوسته کمپانزاسیون قدرت راکتیو ضروری است. به خاطر برخی از مسائل عملی، کمپانزاتورهای استاتیکی (SVC) نسبت به بانکهای خازنی و یا سلفی با مقادیر ثابت، ترجیح داده می‌شوند.

در مقاله حاضر کنترل بهینه یک کمپانزاتور VAR استاتیکی به منظور حداقل نمودن جریانهای خط انتقال الکتریکی صورت می‌گیرد. همچنین روشی ساده و دقیق برای تعیین زاویه آتش یک سلف کنترل شده با تریستور ارائه می‌گردد [4,3].

بدین منظور برای کمپانزاتورهای استاتیکی چهار ترکیب اصلی مورد بحث قرار می‌گیرد:

۱ - سلف کنترل شده با تریستور همراه با خازن ثابت TCR-FC.

۲ - سلف کنترل شده با تریستور همراه با خازن کلیدزن تریستوری TCR-TSC.

۳ - سلف کنترل شده با تریستور همراه با سلف کلیدزن تریستوری و خازن ثابت TCR-TSR-FC.

۴ - سلف کنترل شده با تریستور همراه با سلف و خازن کلیدزن تریستوری TCR-TSR-TSC. برای کنترل در زمان واقعی این روش، توسط یک سیستم کسب داده‌ها مقادیر جریانها و ولتاژهای خط نمونه‌برداری می‌شوند و سپس با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) مقادیر حداکثر فازور جریانها، ولتاژها و زاویه فاز بین آنها محاسبه می‌گردند.

در این روش بعد از نصب کمپانزاتور VAR استاتیکی بهینه، جریانهای خط کمپانزه شده به صورت سه فاز متعادل درمی‌آیند و ضریب قدرت برابر واحد می‌گردد.

۱ - بهینه‌سازی کمپانزاسیون قدرت راکتیو :

در یک سیستم الکتریکی سه فازه کمپانزاتور قدرت راکتیو به صورت اتصال مثلث مطابق شکل (۱) در مدار قرار می‌گیرد، این کمپانزاتور ممکن است از نوع خازنی و یا سلفی باشد. نمودار فازوری ولتاژها و جریانهای سیستم سه فازه در شکل (۲) نشان داده شده است. مسئله بهینه‌سازی کمپانزاسیون قدرت راکتیو، به صورت کمینه نمودن مجموع مربعات

مقادیر مؤثر جریانهای خطوط سیستم بیان می‌گردد. بنابراین تابع هدف مسئله، به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$J(c) = \frac{1}{T} \int_0^T (i_{as}^2 + i_{bs}^2 + i_{cs}^2) dt \quad (1)$$

که i_{cs} ، i_{bs} ، i_{as} و I_{cs} ، I_{bs} ، I_{as} فازور مقادیر حداکثر آنها می‌باشند، با توجه به شکل (۱) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_a + C_{ab} dv_{ab}/dt - C_{ca} dv_{ca}/dt \\ i_{bs} &= i_b + C_{bc} dv_{bc}/dt - C_{ah} dv_{ah}/dt \\ i_{cs} &= i_c + C_{ca} dv_{ca}/dt - C_{bc} dv_{bc}/dt \end{aligned} \quad (2)$$

جریانهای i_a ، i_b و i_c جریانهای کمپانزه نشده طرف بار به صورت سینوسی کامل با مقادیر حداکثر I_a ، I_b و I_c در نظر گرفته می‌شوند. ولتاژهای خط نیز سه فاز سینوسی متعادل با مقادیر حداکثر V می‌باشند.

$$V_{ba} = V_{bc} = V_{ca} = V \quad (3)$$

شرایط بهینه نمودن تابع هدف (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

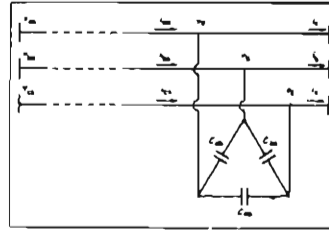
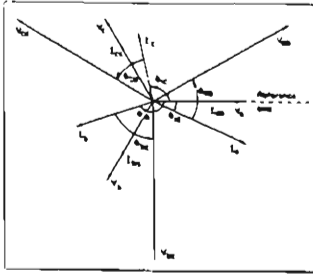
$$\frac{\partial J(c)}{\partial C_{ab}} = 0 \quad \frac{\partial J(c)}{\partial C_{bc}} = 0 \quad \frac{\partial J(c)}{\partial C_{ca}} = 0 \quad (4)$$

با جای‌گذاری جریانهای رابطه (۲) در تابع هدف $J(c)$ و اعمال شرایط بالا مقادیر بهینه کمپانزاسیون قدرت راکتیو C_i^* ($i = ab, bc, ca$) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} C_{ab}^* &= (1/2\omega V)[I_a(\sin\phi_{ab} + f_1 \cos\phi_{ab}) + I_b(f_2 \sin\phi_{bc} - f_3 \cos\phi_{bc}) + I_c(-f_2 \sin\phi_{ca} + f_1 \cos\phi_{ca})] \\ C_{bc}^* &= (1/2\omega V)[I_a(-f_2 \sin\phi_{ab} + f_1 \cos\phi_{ab}) + I_b(\sin\phi_{bc} + f_1 \cos\phi_{bc}) + I_c(f_2 \sin\phi_{ca} - f_3 \cos\phi_{ca})] \\ C_{ca}^* &= (1/2\omega V)[I_a(f_2 \sin\phi_{ab} - f_3 \cos\phi_{ab}) + I_b(-f_2 \sin\phi_{bc} + f_1 \cos\phi_{bc}) + I_c(\sin\phi_{ca} + f_1 \cos\phi_{ca})] \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_1 = 1/(3\sqrt{3}), f_2 = 1/3, f_3 = 5/(3\sqrt{3}) \quad \text{که}$$

در حالت کلی اگر مقدار C_i^* منفی باشد، بدان معنا است که باید به جای خازن یک سلف در کمپانزاتور قرار داده شود.



« شکل (۱) - سیستم الکتریکی سه فازه با کمپانزاتور قدرت راکتو » « شکل (۲) - نمودار فازوری ولتاژها و جریانهای سیم سه فاز »

با توجه به نمودار فازوری شکل (۲) در شرایط کمپانزاسیون بهینه برای جریانهای کمپانزه شده رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_a + C_{ab}^* \omega V \cos(\omega t + 2\pi/3) - C_{ca}^* \omega V \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_{bs} &= i_b + C_{bc}^* \omega V \cos(\omega t) - C_{ab}^* \omega V \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_{cs} &= i_c + C_{ca}^* \omega V \cos(\omega t - 2\pi/3) - C_{bc}^* \omega V \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (۴)$$

با نوشتن معادلات به صورت فازوری و جای‌گذاری مقادیر C_i^* از معادلات (۵) و با در نظر گرفتن اینکه مجموعه جریانها در یک سیستم سه فاز سه سیمه برابر صفر است.

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (۷)$$

مقادیر حداکثر جریانهای خط کمپانزه شده به صورت زیر خواهند بود.

$$\begin{aligned} I_{as} &= (1/3) [2I_a \sin(\phi_{ab} + \pi/3) + I_b \sin(\phi_{bc} + 2\pi/3) + I_c \sin\phi_{ca}] \\ I_{as} &= I_{bs} = I_{cs} \end{aligned} \quad (۸) \text{ و}$$

با توجه روابط (۸) می‌توان نتیجه گرفت که جریانهای I_{as} ، I_{bs} و I_{cs} هم فاز با ولتاژهای V_{a1} ، V_{b1} و V_{c1} می‌باشند. بنابراین جریانهای کمپانزه شده به صورت سه فاز متعادل درمی‌آیند و ضریب قدرت نیز برابر واحد می‌گردد.

۲- کنترل زاویه آتش کمپانزاتورهای استاتیکی :

۲-۱- کمپانزاتور نوع TCR-FC :

شمای تک خطی کمپانزاتور نوع سلف کنترل شده با تریستور همراه با خازن ثابت

(TCR-FC) در شکل (۳) نشان داده شده است. این کمپانزاتور قدرت راکتیو متغیر Q_i را تأمین می‌کند که برابر مجموع قدرت راکتیو خازنی Q_c و قدرت راکتیو سلفی متغیر Q_L می‌باشد.

$$Q_i = Q_c + Q_L$$

$$Q_c = (\omega c V^2)/2 \quad (9)$$

$$Q_L = -I_L^2 \omega L = -(V^2/\omega L \pi) [(\pi - \alpha) (1 + 2 \cos^2 \alpha) + 3 \sin \alpha \cos \alpha]$$

که L اندوکتانس سلف و C مقدار خازن کمپانزاتور هستند، I_L مقدار مؤثر جریان سلف و α زاویه آتش تریستور سلف را نشان می‌دهند.

قدرت راکتیو کمپانزاتور بهینه لازم Q^* برابر است با:

$$Q^* = (\omega C^* V^2)/2 \quad (10)$$

که باید برابر با قدرت راکتیو تأمین شده توسط کمپانزاتور باشد.

$$Q_i = Q^* \quad (11)$$

با جای‌گذاری روابط (۹) خواهیم داشت:

$$\omega^2 (C - C^*) L = S \quad (12)$$

$$S = (2/\pi) [(\pi - \alpha) (1 + 2 \cos^2 \alpha) + 3 \sin \alpha \cos \alpha]$$

و ضریب S در محدوده $0 \leq S \leq 1$ قرار می‌گیرد. اگر $S \leq 0$ باشد در آن صورت قدرت

راکتیو بهینه بزرگتر از قدرت راکتیو خازنی است که کمپانزاتور تأمین می‌کند ($C < C^*$)، اگر

$S > 1$ باشد قدرت راکتیو سلفی بهینه بزرگتر از قدرت راکتیو سلفی کمپانزاتور است. ارتباط

بین ضریب S و زاویه آتش α در شکل (۴) نشان داده شده است.

روابط بالا برای کمپانزاتور تک فازه نوع FCR-FC می‌باشند، برای کمپانزاتور سه فاز در

حالت کلی روابط (۱۲) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\omega^2 (C_i - C_i^*) L_i = S_i \quad (13)$$

$$S_i = (2/\pi) [(\pi - \alpha_i) (1 + 2 \cos^2 \alpha_i) + 3 \sin \alpha_i \cos \alpha_i] \quad (14)$$

$i = ab, bc, ca$

C_i و L_i کمپانزاتور مقادیر معلومند و C_i^* از روابط (۵) محاسبه می‌شود و زاویه آتش α_i از

شکل (۵) بدست می‌آید. به صورت میکروپرسسوری ارتباط بین S و α را می‌توان به صورت

یک جدول بیان نمود، که برای کنترل در زمان واقعی مناسب تر می‌باشد.

۲-۲- کمپانزاتور نوع TCR-TSC:

کمپانزاتور نوع سلف کنترل شده با تریستور همراه با خازن کلیدزن تریستوری

(TCR-TSC) در شکل (۴) نشان داده شده است، که شامل n تریستور است که بانکهای خازنی را قطع و وصل می‌کند و یک بانک سلفی کنترل شده با تریستور می‌باشد. چون این کمپانزاتور n بانک خازنی دارد، رابطه (۱۳) به صورت زیر اصلاح می‌گردد.

$$\omega^2 (k_i C_i - C_i^*) L_i = S_i \quad , \quad i = ab, bc, ca \quad (15)$$

$$k_i = 0, 1, 2, \dots, n_i$$

و k_i طوری انتخاب می‌شود که $0 \leq S_i \leq 1$ گردد و ضریب S_i طبق رابطه (۱۴) می‌باشد.

۳-۲- کمپانزاتورهای نوع TCR-TSR-TSC و TCR-TSR-FC :

در این نوع کمپانزاتورها سلف L به m بانک سلفی کوچک، هر یک با اندوکتانس mL تقسیم می‌گردد. تنها یکی از m بانک سلفی به صورت کنترل شده فازی (TCR) می‌باشد و بقیه $1 - m$ بانک سلف به صورت کلیدزن تریستوری (TSR) هستند. در این کمپانزاتورها روابط (۱۳) و (۱۵) به شکل زیر اصلاح می‌شوند:

الف - کمپانزاتور نوع سلف کنترل شده با تریستور همراه با سلف کلیدزن تریستوری و خازن ثابت (TCR-TSR-FC).

$$\omega^2 (C_i - C_i^*) mL_i = S_i + j_i \quad , \quad i = ab, bc, ca \quad (16)$$

ب - کمپانزاتور نوع سلف کنترل شده با تریستور همراه با سلف و خازن کلیدزن تریستوری (TCR-TSR-TSC).

$$\omega^2 (k_i C_i - C_i^*) mL_i = S_i + j_i \quad , \quad i = ab, bc, ca \quad (17)$$

که در آنها

$$j_i = 0, 1, 2, \dots, m_{i-1}$$

m_{i-1} تعداد سلفهای نوع TSR و n_i تعداد بانکهای خازنی در هر فاز هستند.

j_i طوری انتخاب می‌گردد که $0 \leq S_i \leq 1$ و k_i نیز چنان اختیار می‌شود که $C_i - C_i^* < C_i$ باشد. $0 \leq k_i$ باشند، S_i هم طبق رابطه (۱۴) می‌باشد.

۳- روش کنترل در زمان واقعی :

در پردازشگر سیستم کسب داده‌های دیجیتالی در زمان واقعی، مقادیر حداکثر ولتاژ خط و جریان و زاویه فاز که در رابطه (۵) استفاده می‌شوند، با روش تبدیل فوریه گسسته (DFT) محاسبه می‌گردند [5]. یک موج سینوسی کامل ولتاژ و یا جریان برحسب مقدار حداکثر Y_m

فرکانس اصلی ω و زاویه فاز ϕ به صورت زیر بیان می‌شود.

$$Y(t) = Y_m \cos(\omega t + \phi) \quad (17)$$

فرض کنید که این سیگنال در هر سیکل N نقطه نمونه برداری گردد، دامنه n ام نقطه نمونه برداری در زمان t_n برابر است با:

$$\begin{aligned} Y_n &= Y_m \cos(\omega t_n + \phi) \\ &= Y_m \cos(2n\pi/N + \phi) \end{aligned} \quad (18)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

تبدیل فوریه گسسته Y_n با فرکانس موج اصلی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Y_d = (2/N) \sum_{n=0}^{N-1} [Y_n \exp(-j2n\pi/N)] \quad (19)$$

$$Y_d = (2/N) \sum_{n=0}^{N-1} [Y_n \cos(2n\pi/N)] - j(2/N) \sum_{n=0}^{N-1} [Y_n \sin(2n\pi/N)]$$

با جای‌گذاری Y_n از رابطه (18) داریم.

$$Y_d = Y_m \cos\phi + jY_m \sin\phi = Y_{dr} + jY_{di} \quad (20)$$

و مؤلفه‌های حقیقی و موهومی Y_d به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$Y_{dr} = (2/N) \sum_{n=0}^{N-1} [Y_n \cos(2n\pi/N)] \quad (21)$$

$$Y_{di} = -(2/N) \sum_{n=0}^{N-1} [Y_n \sin(2n\pi/N)]$$

بنابراین می‌توان مقدار حداکثر موج Y_m و زاویه فاز ϕ را با استفاده از رابطه (17)

محاسبه نمود.

$$Y_m = (Y_{dr}^2 + Y_{di}^2)^{1/2} \quad (22)$$

$$\phi = \tan^{-1}(Y_{di}/Y_{dr})$$

بنا به تئوری نمونه برداری، فرکانس نمونه برداری (ω_s) باید بزرگتر از دو برابر فرکانس

سیگنال (ω) باشد.

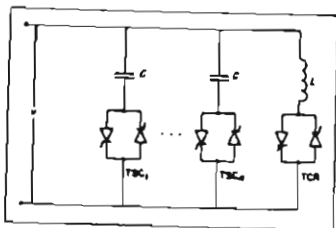
$$\omega_s > 2\omega \quad (23)$$

یعنی برای هر سیکل باید بیشتر از دو نقطه نمونه برداری شود. در عمل به خاطر وجود

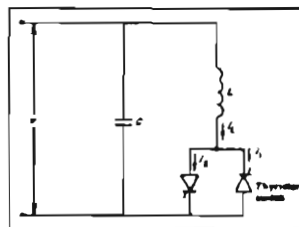
نویزها رمونیک در موجهای ولتاژ و جریان خطوط انتقال و یا توزیع برق نمونه‌های بیشتری

برای هر سیکل انتخاب می‌گردند.

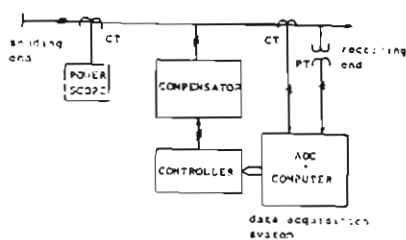
یک سیستم عملی برای کسب داده‌های دیجیتالی برای کنترل کمپانزاتور بهینه در زمان واقعی، در شکل (۶) نشان داده شده است.



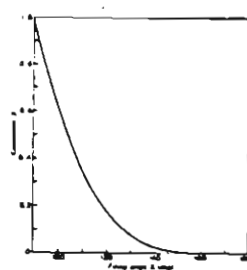
« شکل ۴ - کمپانزاتور نوع TCR-TSC »



« شکل ۲ - کمپانزاتور نوع TCR-FC »



« شکل ۶ - سیستم عملی کسب داده‌های دیجیتالی »



« شکل ۵ - تغییرات ضریب S با زاویه آتش تریستور alpha »

۴ - مثال عددی :

برای شبیه‌سازی مسئله کمپانزاسیون بهینه برنامه کامپیوتری نوشته شد، که الگوریتم آن طبق روابط بخشهای قبل در فلوجارت شکل (۷) نشان داده شده است.

در این مثال عددی فرض می‌شود که یک ولتاژ خط متعادل و ثابت با دامنه $\sqrt{2} \times 11400$ v فرکانس 60 Hz در طرف بار اعمال می‌گردد. به کمک سیستم کسب داده‌های دیجیتالی و پردازش DFT مقادیر حداکثر جریانهای خط کمپانزه نشده (I_a, I_b, I_c) و زاویه فاز آنها (ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c) محاسبه می‌گردند که به ترتیب در شکلهای (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند. مقادیر بدست آمده برای کمپانزاسیون بهینه ($C^*, i = ab, bc, ca$) در شکل (۱۰) نمایش داده می‌شوند. زاویه‌های آتش و تعداد شاخه‌های «وصل شده» برای دو نوع کمپانزاتور استاتیکی به

صورت زیر تعیین می‌گردند:

الف - کمپانزاتور نوع $TCR-FC$:

فرض می‌کنیم که این کمپانزاتور قدرت راکتیو متغیری از 500 Kvar تا 150 Kvar را تأمین می‌کند، بنابراین مقدار خازن و سلف کمپانزاتور برابر است با:

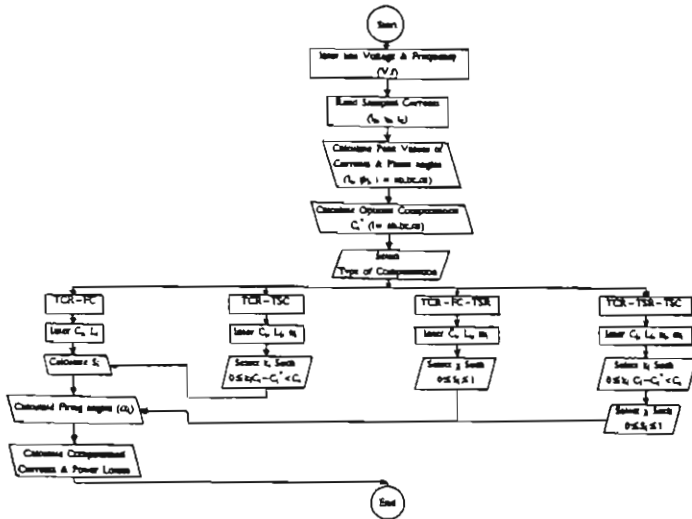
$$C = 10 \mu f \quad , \quad L = 0.53 H$$

به کمک الگوریتم پیشنهادی زاویه‌های آتش α_i برای سلف TCR تعیین می‌گردند که در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند.

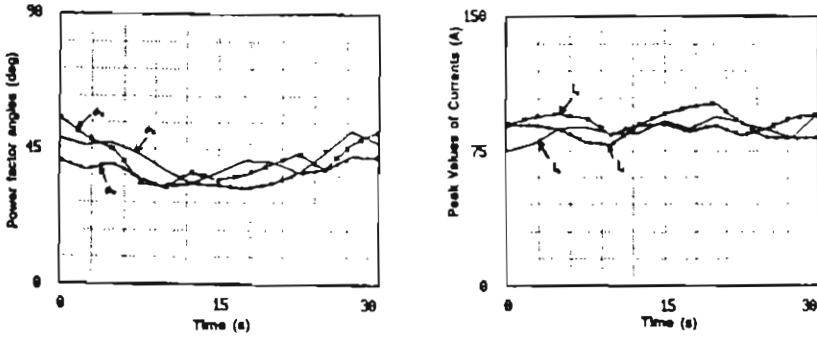
ب - کمپانزاتور نوع $TCR-TSC$:

فرض می‌شود که خازن به چهار بانک خازنی تقسیم می‌گردد. اگر کمپانزاتور قدرت راکتیو متغیری از 4×150 Kvar تا 150 Kvar را تأمین کند، در آن صورت ظرفیت هر بانک خازنی برابر $C = 3 \mu f$ و اندوکتانس سلف $L = 2.3 H$ خواهد بود. زاویه‌های آتش سلف TCR و تعداد بانکهای خازنی «وصل شده» محاسبه شده در شکل‌های (۱۲) برای فازهای ab، bc و ca نمایش داده شده‌اند.

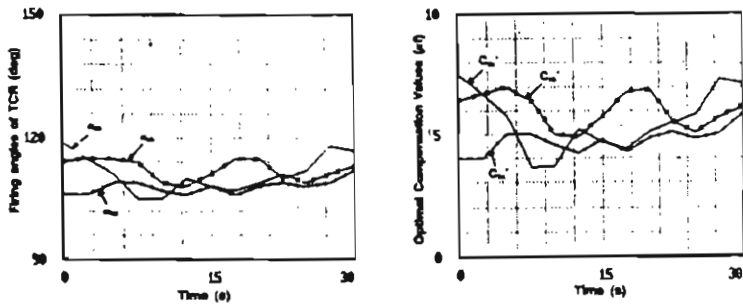
شکل (۱۳) نشان می‌دهد که بعد از نصب کمپانزاتور بهینه (C_i^*) جریانهای خط به صورت سه فاز متعادل درآمده و دامنه آنها حداقل می‌گردند و نیز ضریب قدرت حاصل برابر واحد می‌شود. تلفات قدرت اکتیو خط برای شرایط قبل و بعد از کمپانزاسیون بهینه در شکل (۱۴) رسم شده است، می‌توان دید با فرض ولتاژ خط ثابت، تلفات قدرت اکتیو خط بعد از کمپانزاسیون حداقل می‌گردد.



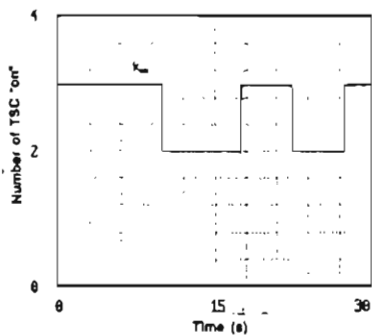
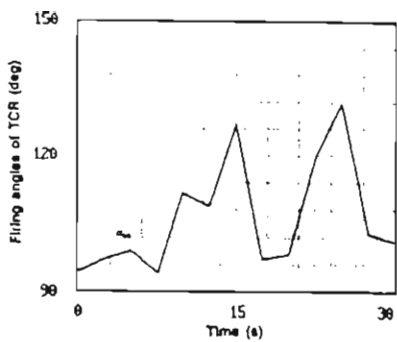
شکل ۷ - فلوچارت برنامه کامپیوتری «کمپانزاسیون بهینه»



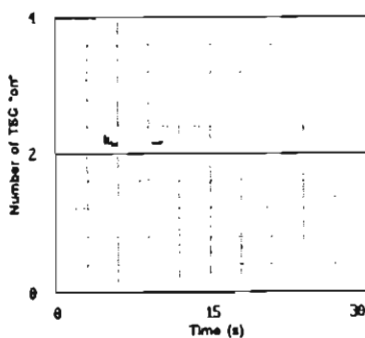
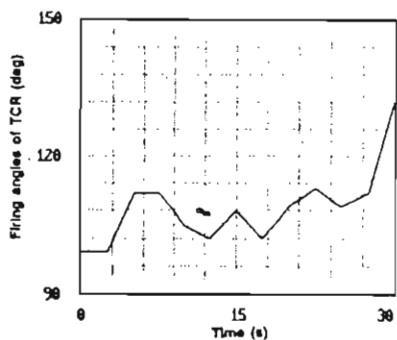
شکل ۸ - تغییرات مقادیر حداکثر جریانهای نمونه برداری خط کمپانزه نشده « شکل ۹ - تغییرات مقادیر فازهای نمونه برداری خط کمپانزه نشده «



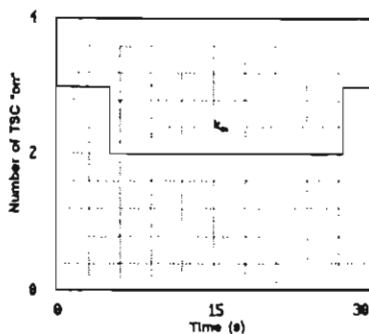
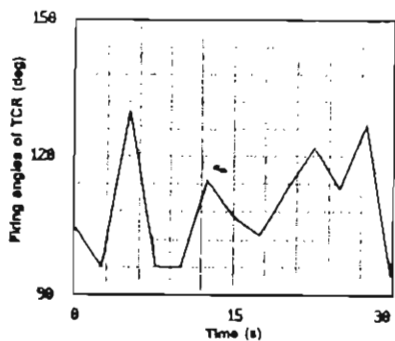
شکل ۱۰ - مقادیر محاسبه شده کمپانزاسیون بهینه « شکل ۱۱ - مقادیر زاویه های آتش TCR برای کمپانزاتور نوع TCR-FC «



« الف - تغییرات فاز ab »

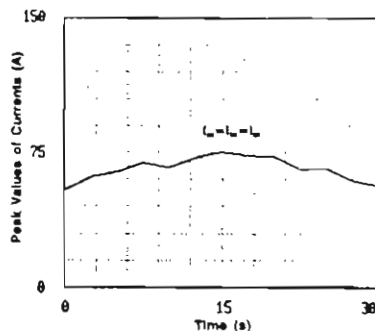
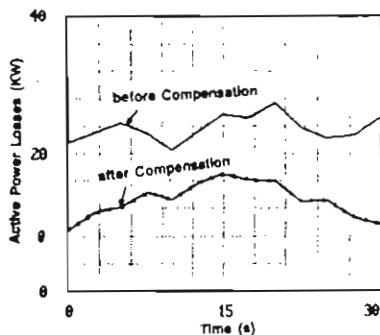


« ب - تغییرات فاز bc »



« ج - تغییرات فاز ca »

« شکل ۱۲ - مقادیر زاویه‌های آتش TCR و تعداد بانکهای خازنی وصل شده TSC برای کمباناتور نوع TCR-TSC »



« شکل ۱۳ - معادیر حداکثر جریانها متعادل خط با کمپانزاسیون بهینه » « شکل ۱۴ - تلفات قدرت اگسو خط، قبل و بعد از کمپانزاسیون بهینه »

۵ - نتیجه گیری :

در این مقاله روشی ساده برای کمپانزاسیون بهینه قدرت راکتیو جهت کمینه کردن تلفات قدرت اکتیو خط در ولتاژ ثابت ارائه گردید. بعد از نصب کمپانزاتور استاتیکی بهینه جریانهای خط به صورت سه فاز متعادل با ضریب قدرت واحد درمی آید. نتایج حل مثال عددی نیز مؤثر بودن روش را در ایجاد شرایط متعادل برای جریانها و کمینه کردن دامنه آنها بطور وضوح نشان داد.

به دلیل روش ساده محاسباتی پیشنهاد شده، حل کامپیوتری آنها سریع تر بوده و به حافظه کمتری نیاز دارد. بنابراین کنترل در زمان واقعی این روش با استفاده از میکروپروسورها مناسب می باشد.

۶ - منابع :

1. Miller, T J E, "Reactive power Control in Electric systems." wiley, New York (1982).
2. Ryerly, R T, Ponaniak, D T and Taylor, E R, "Static reactive compensation for power transmission system", IEEE Trans. on PAS, Vol. 101 (1982).
3. Gyugi, L, Otto, R A and Putman, T H, "Principles and applications of static thyristor-controlled shunt compensators," IEEE Trans. on PAS, Vol. 97 (1978).
4. Torseng, S, "Shunt-Connected reactors and capacitors controlled by thyristor," IEE proc. Vol. 128 (1981).
5. Chen, C. T, "One-Dimensional Digital Signal processing." State university of New York at stony Brook, New York (1979).