

# روش قدرت برای تجزیه و تحلیل هارمونیک سیستم‌های قدرت شامل راکتورهای کنترل شده THYRISTOR

مجید عزتی مصلح

محمد مهدی قنبریان

دانشکده صنعت آب و برق شیراز

دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون- برق منطقه‌ای فارس

بخش برق- گروه قدرت

تلفن: ۰۹۱۲۳۰۸۴۶۹۷

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۰۰۸۳۳

E-mail: omidezati2000 @ yahoo.com

E-mail: m\_ghanbarian @yahoo.com

## چکیده:

این مقاله یک روش قدرت را برای تجزیه تحلیل تعامل میان راکتورهای سوئیچ شده و شبکه عرضه آنها با کاربرد ویژه جهت TCR ها را ارائه می‌نماید. ضمناً به طور تحلیلی نشان می‌دهد که برای سیستمی شامل یک راکتور سوئیچ شده، یک قدرت اکتیو روی می‌دهد: قدرت را در فرکانس عملیاتی شبکه جذب می‌نماید که کاملاً به عنوان قدرت‌های اکتیو هارمونیک برگشته‌اند، یعنی مجموعه‌ای که کل افت‌های هارمونیک را ایجاد می‌کنند. تأثیرات عوامل مختلف (مانند TCR نسبت به VAR، محل آن یا زوایای انتقال thyristor) بر این قدرت‌های اکتیو هارمونیک بتوسط شبیه سازی در سیستم موازنه شده IEEE 14 bus مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مطالعات در مورد تعاملات قدرت میان TCR و عرضه شبکه، عوامل قدرت بدون تأثیر بودند. از طرف دیگر عامل جابجا سازی برای چنین منظوری مناسب‌ترین به نظر می‌رسد. بالاخره، یک مقدار جدید مطرح می‌شود، یعنی افت‌های قدرت بخصوص از یک راکتور سوئیچ شده، به عنوان نسبت کل قدرت اکتیو هارمونیک، با TCR و نسبت راکتیو آن در شبکه تزیق می‌شود. جابجا سازی قابل محاسبه، توان انجام محاسبه افت‌های Price یک VAR سوئیچ شده را برای محل تعیین شده و وضعیت عملیاتی عنصر سوئیچ شده، ایجاد می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** TCR- زوایای انتقال Thyristor- راکتورهای سوئیچ شده- هارمونیک سیستم‌های قدرت.

## ۱- مقدمه

برای انجام عملیات در وضعیت موج سان، سیستم قدرت می‌بایست تحمل تعداد فزاینده و مقدار عناصر غیر خطی مانند مبدل‌های AC/DC، اشباع و تقویت ترانسفورمر، تندرهای کماتی، رسیورهای تلویزیونی، SVC ها و بسیاری دیگر، را داشته باشند. آخرین گروه، گروه بندی عناصر خطی سوئیچ شده (TCR، TCS ها) یک شکل قابل تطبیقی از توانایی موازنه کردن را برای واکنش تقریباً بطور ثابت نسبت به شرایط عملیاتی مختلف در شبکه قدرت، ارائه می‌نمایند. SVC در کنترل ولتاژ استفاده می‌شود، بخصوص برای شرایط مختلف مثلاً برای سیستم ضعیف bus ها یا bus های عرضه کننده بارهایی که با قدرت راکتیو متغیر عمل می‌کنند. مزایای آشکار آنها برحسب آلودگی هارمونیک با اثرات منفی ذاتی ارائه می‌شوند. [۴] ما TCR ها را به عنوان نماینده‌ای جهت رفتار کلی عناصر راکتیو سوئیچ شده انتخاب کرده‌ایم.

توجه ویژه معمولاً بر TCR بوده است، که مدلسازی بخوبی انجام شود. [۳] دو روش جایگزین، یعنی روش زمان و دامنه فرکانس برای مشخص کردن رفتار TCR جهت بحث و شرایط عملیاتی واقعی، بکار گرفته شده‌اند. بنابراین، حساسیت TCR برای عرضه انحرافها [۱۰ و ۱۱] و عدم توازن‌های ولتاژ [۷ و ۸]، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین تأثیر

نقایص ساختمانی (عدم توازن TCR) بر عملکرد TCR در زاویه‌های انتقالی مختلف مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد. [۸] امتیاز و مزیت محاسبه‌ای آنها ورای تصور است؛ بزرگی ولتاژ و عامل انحراف هارمونیک کل برای ارزشیابی سطح آلودگی شبکه و اسپیکتروم جریان می‌توانند مشارکت TCR را برای حالت آلودگی کل شبکه نشان دهند. [۹] با اینحال، علی‌رغم مزیت آشکارشان، این عوامل برای تعامل عنصر غیرخطی با ارزشیابی سیستم قدرت، ضروری هستند اما کافی نیستند.

تجزیه و تحلیل دیگری، در مورد base های قدرت، لازم است تا سهم هر هارمونیک را برای جریان انرژی الکتریکی، آنگونه که توسط گروه کاری TEEE در وضعیت‌های غیر Sinusoidal انجام شده است، درک کنیم. [۵] در این مقاله چنین آنالیزی انجام شده و سپس در مورد نتایج بحث گردیده است.

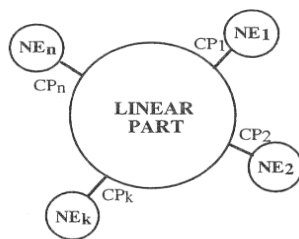
## ۲- جریان قدرت هارمونیک: ضرورت و ابزار

برای نشان دادن ضرورت جهت آنالیز جریان قدرت، پیشنهاد می‌شود که پاسخ یک سؤال مربوط به یک شکل عملی را پیدا کنیم: یک سیستم قدرت را در نظر بگیرید که برای قدرت راکتیو و TCR های کنترل ولتاژ بکار گرفته می‌شود. برای هر حالت پیوسته بطور معکوس برای نمونه استفاده از راکتورهای سنتی، جریان به مقادیر rms افزایش یافته، می‌رسد، و بنابراین افت‌های هارمونیک رخ می‌دهد. این افت‌های ایجاد شده با چه نوع انتقال قدرت اکتیو، ایجاد می‌شوند؟

برای رسیدن به پاسخ چنین سؤالی، لازم است که یک مطالعه تحقیقی در مورد جریان قدرت هارمونیک انجام بدهیم. ضروری است که از یک (نوع) ابزار استفاده کنیم، یعنی از آرگوریتم جریان قدرت (و بالاخره از نرم افزار). انتخاب شخص در مورد روش هیبریدی، براساس روش دیاکوپتیک انجام می‌شود که در آن سیستم به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: قسمت خطی مدلسازی شده در دامنه فرکانس و بخش غیرخطی شبیه سازی شده که اغلب در دامنه زمانی انجام می‌شود مگر اینکه در دامنه فرکانس این امکان وجود نداشته باشد. برای حالت (مورد نظر) ما، عناصر غیر خطی  $NE_1, \dots, NE_n$  از شکل ۱، TCR ها می‌باشند.

جریان بارگیری هارمونیک شامل دو بخش اصلی می‌باشد:

(i) جریان بارگیری اساسی نیوتن رافسون، از قدرت بنیانی و (اساسی) در تمام bus ها ایجاد می‌شود، و از تمام ولتاژهای اقتباس می‌شود (مقدار و فاز) تا:



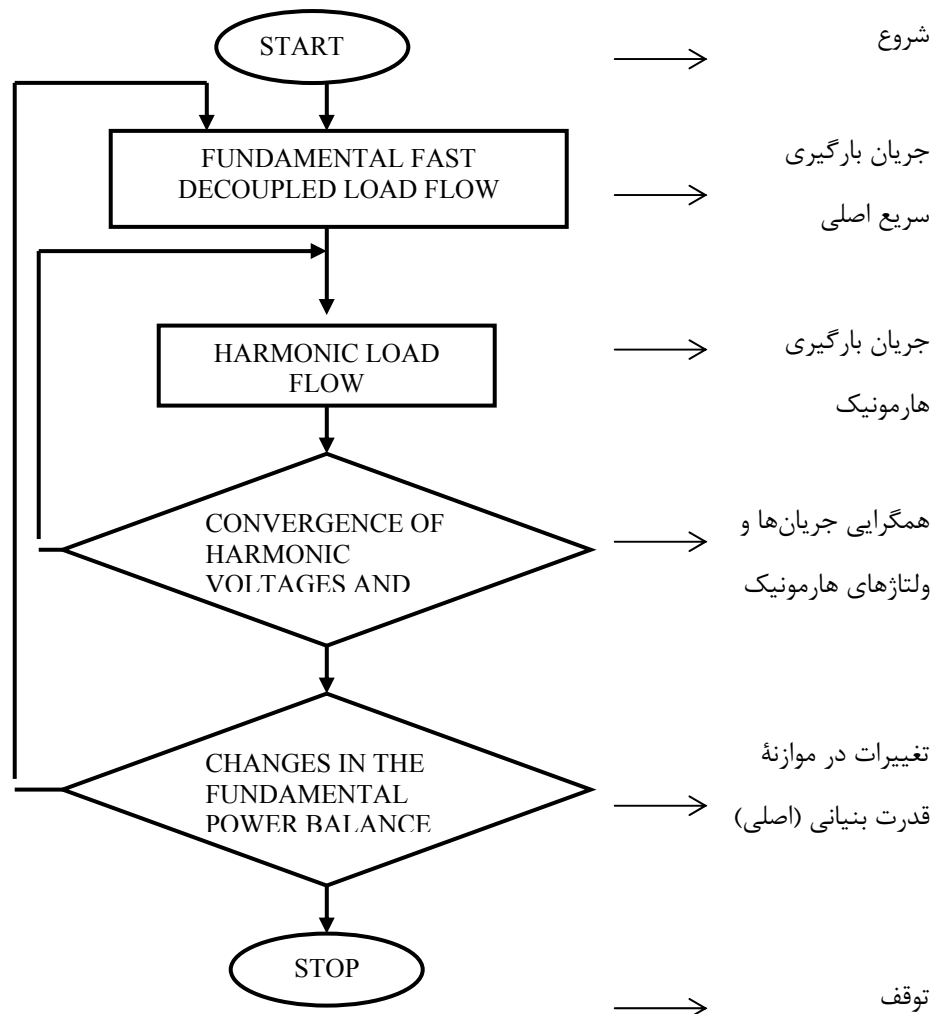
شکل ۱: spitting سیستم قدرت

(ii) جریان بارگیری هارمونیک، در حقیقت یک استفاده مجدد از معادله nodal:

$$[U_K] = [Y_K]^{-1} [I_K] \quad (1)$$

که  $[U_K]$  و  $[I_K]$ ، بردارهای هارمونیک‌های ولتاژ و جریان (در شکل پیچیده‌اش) و  $[Y_K]$  ماتریس ورود NODAL برای هارمونیک K ام می‌باشند.

آزمایش نهایی برای قدرت‌های اساسی نشان می‌دهد که آیا ضروری است که با مرحله (i) دوباره شروع نمائیم و یا آنرا متوقف کنیم، این (مطلب) در نمودار ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار جریان بارگیری هارمونیک

### ۳- موازنه قدرت اکتیو برای وضعیت‌های Nonsinusoidal

inputs (ورودی‌های) قدرت اکتیو واقعی کل سیستم، تزریق‌های قدرت اساسی (اصلی) ژنراتورها می‌باشند (که بوسیله توربین‌ها ایجاد می‌شوند) در سطح اساسی و (اصلی)، موازنه قدرت (برابری میان قدرت‌های اکتیو ژنراتورها و مصارف بارها) بتوسط مدل سیستمی مورد استفاده در مرحله (i) از قسمت قبلی، ایجاد می‌شود. همان گونه که عناصر غیرخطی تنها مستعد (آماده) ایجاد یک انتقال فرکانس قدرت اکتیو می‌باشند، انتظار می‌رود که در نقاط کوپلینگ آنها ( $CP_K$ ) از شکل (۱) یک قسمت از قدرت اکتیو اساسی مورد تقاضا، با فرکانس‌های بالاتر مجدداً در شبکه تزریق شوند. این تزریق قدرت اکتیو با فرکانس‌های بالا، قدرت‌های اکتیو هارمونیک نامیده می‌شوند. بعلاوه چنین تزریق‌هایی، عناصر غیر خطی، معمولاً منابع هارمونیک نامیده می‌شوند. برای هر گروه هارمونیک، قدرت اکتیو نیز بالانس (موازنه) می‌شود، زیرا:

$$\sum_{K=1}^N P_{inj,k}^{(h)} = \sum_{j=1}^N P_{abs,j}^{(h)} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Delta P_{ij}^{(h)} \quad (2)$$

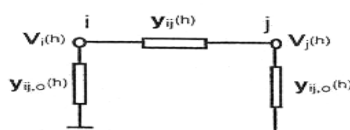
$P_{inj,k}^{(h)}$  عبارتست از قدرت اکتیو تزریق شده در bus K ام بره‌هارمونیک h ام، و  $P_{abs,j}^{(h)}$  عبارتست از افت واکنشی نسبت به شاخه‌ای از bus i به bus j در هارمونیک h ام. این قدرت‌ها می‌توانند بترتیب زیر بیان شوند:

$$P_{inj,k}^{(h)} = \text{Re} \left( \sum_{j=1}^N \left( Y_{kj}^{(h)} \right)^* V_k^{(h)} \left( V_j^{(h)} \right)^{\circ} \right) \quad (3)$$

$$P_{abs,j}^{(h)} = \left( V_j^{(h)} \right)^2 \text{Re} \left( Y_{a,j}^{(h)} \right)^* \quad (4)$$

$$\Delta P^{(h)} = \text{Re} \left\{ \left( y_{ij}^{(h)*} + y_{ij,0}^{(h)*} \right) \left[ \left( V_i^{(h)} \right)^2 + \left( V_j^{(h)} \right)^2 \right] - y_{ij}^{(h)*} \left[ V_i^{(h)} \left( V_j^{(h)} \right)^* + V_j^{(h)} \left( V_i^{(h)} \right)^* \right] \right\} \quad (5)$$

که  $Y_{ij}^{(h)}$  عنصر  $ij$  از ماتریس ورود nodal برای هارمونیک  $h$ ام،  $Y_{a,j}^{(h)}$  ورودی اضافی به node 'j' که نشان دهنده بارهای خطی متصل به آنجا می باشد، و  $Y_{ij,o}^{(h)}$  و  $Y_{ij}^{(h)}$  پارامترهای طولی و متقاطع شاخه 'ij' می باشند، همان گونه که در نمودار ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۳- مدل خطی  $\pi$

این بالانس‌های (توازن‌های) قدرت اکتیو (واقعی برای هارمونیک اصلی و ظاهری (صوری) برای هر هارمونیک) پاسخ سوال مطرح شده را ارائه می کنند: TCR عمل کننده در یک  $CP_j$  مطالبه یک قدرت اکتیو اصلی را ایجاد می کند که تماماً تبدیل به فرکانس‌های بالاتر شده باشد و افت اضافه‌ای را برای تمام گروه‌ها (دسته‌های) هارمونیک‌ها ایجاد می نماید.

تبدیل فرکانس قدرت اکتیو یک مشخصه‌ای از تمام عناصر سوئیچ شده و غیر خطی می باشد. شکل خاص تبدیل فرکانسی قدرت اکتیو TCR از فقدان هرگونه مصرف قدرت اکتیو ایجاد می شود، که صرفاً یک قدرت اکتیو را در سطح اصلی (مقدار متغیر در شرایط عملیاتی TCR) مطالبه می نماید که سپس (بعد از آن) برای بخش غیرخطی سیستم قدرت «جهت مصرف اجباری (اضطراری)» تقویت (تجدید) می شود.

#### ۴- تجزیه و تحلیل قدرت اکتیو برای TCR

کل قدرت اکتیو در نقطه کوپلینگ TCR همان null می باشد. این مطلب از نظر فیزیکی و ریاضی واضح است زیرا در یک سطح تناوبی انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی (اینداکتور) inductor، صفر می باشد زیرا:

$$L_R \frac{di_R}{dt} = u_S \quad (6)$$

برای فاصله‌های انتقالی Thyristor و  $i_R = 0$  برای فاصله‌های off-state. بنابراین به محض اینکه قدرت برای تناوب‌های off-state Thyristor قطع (Null) بشود و:

$$P(t) = v_S(t) i_R(t) = \frac{d}{dt} (L_R i_R^2) \quad (7)$$

برای تناوب‌ها، هنگامی که راکتور به ولتاژ ایجاد شده متصل می شود. که به موجب آن قدرت اکتیو عبارتست از:

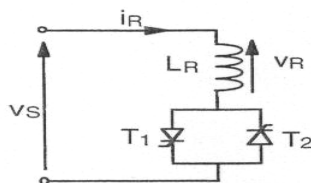
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = 0 \quad (8)$$

زیرا جریان در راکتور، هم در لحظاتی که آتش می گیرد (شعله‌ور میشود) و هم در لحظاتی که آتش خاموش میشود، قطع می گردد. با این حال این بدان معنی نیست که هیچ چرخه (مدار) قدرت اکتیو، برای ایجاد TCR در نقطه کوپلینگ آن، با

آن مرتبط نمی‌باشد. زیرا قدرت اکتیو اصلی، صفر نمی‌باشد، قدرت اکتیو هارمونیک کل (THAP) که با Grou در حال کار TEEE معرفی (تعریف) می‌شود، قطع نمی‌باشد:

$$P_H = \sum_{j=2}^{\infty} U_S^{(j)} I_R^{(j)} \cos(\varphi_j - \beta_j) = -P_1 \neq 0 \quad (9)$$

که  $U_S^{(j)}$  و  $\varphi_j$  (دارای مقادیری) بسیار بزرگ می‌باشند و زاویه فازی برای هارمونیک  $h$  ام ولتاژ ایجاد شده نیز بزرگ است،  $I_R^{(j)}$  و  $\beta_j$  (دارای مقادیری) بسیار بزرگ هستند و زاویه فازی برای هارمونیک  $h$  ام جریان رآکتور نیز مقدار بزرگی می‌باشد.



شکل ۴- مدار TCR

برای اثبات این (موضوع) TCR تک فازی را که در شکل ۴ و با ولتاژی ایجاد می‌شود که سری فوریه می‌باشد، در نظر می‌گیریم:

$$V_S = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_S^{(k)} e^{jk\omega t} = \sum_{h=1}^{\infty} U_S^{(h)} \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (10)$$

با وارد شدن دو Thyristor دارای تناوب‌های انتقالی برابر  $\delta$  و  $\pi$ ، لحظات اشتعال انتقال یافته  $\Phi - \delta/2$  و  $\Phi - \delta/2 - \pi$ ، جریان داخل رآکتور می‌تواند در سری فوریه مجموع مانند آنچه که در ضمیمه ۱ تشکیل شده است، قرار داده شود:

$$i_R = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{V_S^{(k)}}{jm\omega L_R} \frac{2 \sin \frac{(m-k)\sigma}{2}}{\pi(m-k)} e^{jm(\omega t - \varphi)} \quad (11)$$

با  $\Phi$ ، در میانه تناوب انتقالی. یقیناً مقدار زاویه  $\Phi$  می‌بایست یک انتگرال ولتاژ ایجاد شده خنثی را در روی تناوب انتقالی  $[\Phi - \delta/2, \Phi + \delta/2]$  تأمین نماید. که این علت، آنست که آن راه حل معادله زیر را ارائه می‌کند. [۲]

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin \frac{m\sigma}{2} U_S^{(m)} \sin(m\phi + \varphi_m) = 0 \quad (12)$$

مطابق معمول سری فوریه واقعی:

$$i_R = \sum_{h=1}^{\infty} I_R^{(h)} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (13)$$

که این می‌تواند در رابطه با سری phasor های هارمونیک باشد:

$$\{I_R^{(h)} = I_R^{(h)} e^{j\beta_h}\}_{h=1,\infty} \quad (14)$$

برای phasor اصلی، سه بخش (قسمت) جزئی می‌تواند بدین ترتیب تعریف شود:

$$I_R^{(1)} = I_{R_1}^{(1)} + I_{R_2}^{(1)} + I_{R_3}^{(1)} \quad (15)$$

که اولی عبارتست از:

$$I_{R_1}^{(I)} = \frac{1}{j\omega L_{eq}} U_s^{(I)} e^{j\phi_1} \quad (16)$$

$$L_{eq} = \frac{\pi L_R}{\sigma - \sin \sigma} \quad (17)$$

که این ورود (ایجاد یا inductance) یکسان و برابر TCR برای یک ولتاژ سینوسی sinusoidal در فرکانس اصلی (می باشد) [۶]؛ با انتقال یافتن (به اندازه)  $\pi/2$  از ولتاژ اصلی ایجاد شده، هیچ قدرت اکتیوی حمل (منتقل) نمی شود. دومی عبارتست از:

$$I_{R_2}^{(I)} = \frac{1}{j\omega L_R} \frac{\sin \sigma}{\pi} U_s^{(I)} e^{j\phi_1} - \frac{1}{j\omega L_R} \frac{\sin \sigma}{\pi} U_s^{(I)} e^{-j(\phi_1 + 2\phi)} \quad (18)$$

که بستگی به آن دارد که ولتاژ اصلی ایجاد شده تحت تأثیر هارمونیک ولتاژ ولو با  $\Phi$  باشد. این موضوع بخصوص نسبت به انتقال فاز در بین هارمونیک ها حساس می باشد. در حالت عدم وجود چنین انتقال فاز یا برای حالت سینوسی Sinusoidal وقتی که  $\phi = -\phi_1$ ، این قسمت، قدرت اکتیوی را حمل (منتقل) نمی کند. به عبارت دیگر، هر چه هارمونیک های ولتاژ ایجاد شده بیشتر انتقال یابند قدرت اکتیو بیشتری را حمل می کند. بالاخره، آخرین (سومین) جزء، مجموع اکثر اجزاء هم می باشد:

$$I_{R_3}^{(I)} = -\frac{1}{\pi} \frac{1}{j\omega L_R} e^{-j\phi} \sum_{k=2}^{\infty} \left( \frac{\sin \frac{(K-1)\sigma}{2}}{K-1} e^{j(K\phi + \phi_K)} - \frac{\sin \frac{(K+1)\sigma}{2}}{K+1} e^{-j(K\phi + \phi_K)} \right) \quad (19)$$

که این تأثیر تمام هارمونیک های ولتاژ ایجاد شده را بر جریان اصلی داخل رآکتور، ارائه می نماید. قدرت اکتیوی که فرض می شود تنها برای عرضه سینوسی Sinusoidal صفر باشد.

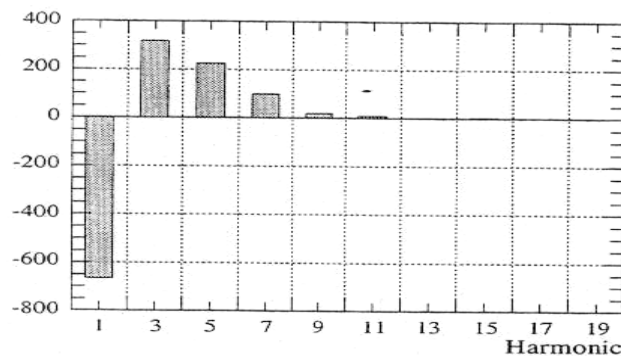
این می تواند نتیجه دهد که علی رغم اینکه هیچ قدرت اکتیوی توسط خود TCR مصرف نمی شود، نتایج (عملکرد) آن مستلزم یک قدرت اکتیوی است که از منابعی در فرکانس عملیاتی شبکه ایجاد (ترسیم) می شود و تماماً در شبکه و با فرکانس های بالاتر تقسیم می شود. همانگونه که مشاهده خواهد شد، هر چه زاویه انتقالی کوچکتر باشد، این قدرت اکتیو بزرگتر می شود. مجموع این THAP، برای تمام TCR ها یا بارهای غیرخطی، کل افت هارمونیک در سیستم را ارائه می کند.

##### ۵- آزمایش های نمونه و نتایج شبیه سازی

یکسری آزمایشات که در سیستم متوازن (بالانس شده) IEEE 14bus (ضمیمه ۲) انجام گرفته است، با جایگزین کردن یک عنصر رآکتیو با یک TCR تغییر داده شده است. حالت اولیه (اساسی) برای این تحقیق (مطالعه) یک حالت  $10\text{MVAR}$ ،  $\delta = 45^\circ$

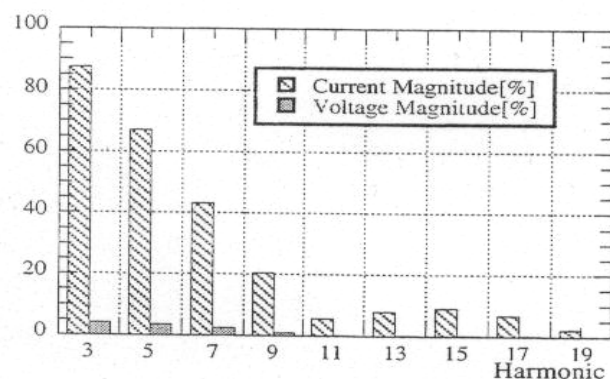
TCR متوازن متصل به  $node\ n^{\circ}9$  است، که منجر (منتهی) به یک سطح آلودگی معین در شبکه می شود. از طیف قدرت اکتیو ترسیم شده در نمودار ۵، می توان نتیجه گرفت که تقریباً کل مقدار قدرت های اکتیو هارمونیک در محدوده ای از

3rd بالای هارمونیک یازدهم متمرکز شده‌اند. بنابراین افت هارمونیک شبکه برای دسته‌های (گروه‌های) هارمونیک پایین‌تر، مهم‌تر می‌باشد.

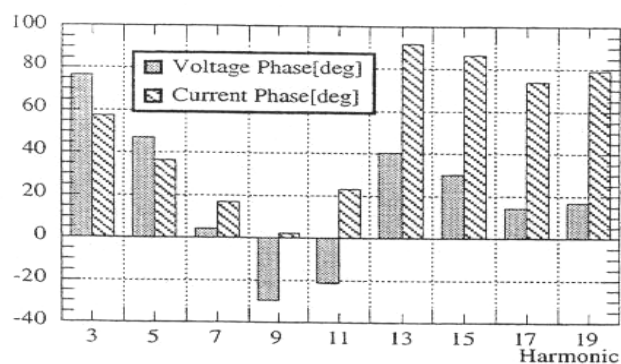


شکل ۵- طیف قدرت اکتیو برای حالت اولیه (اصلی)

این قدرت‌های اکتیو هارمونیک، براساس بزرگی (مقدار) و طیف هارمونیک فازی ولتاژ TCR و جریان ایجاد شده در نمودار ۶، محاسبه گردیده است.



شکل ۶ a طیف مقدار (بزرگی) جریان و ولتاژ



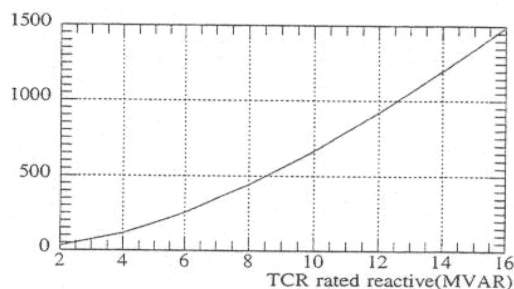
شکل ۶ b طیف فازی جریان و ولتاژ

تأثیر محدوده هارمونیک مورد استفاده برای ارائه دامنه هارمونیک TCR، بر دقت نتایج، مورد بررسی قرار گرفته است. هیچ تفاوت مهمی (معینی) برای یک محدوده از ۲۰ تا ۱۰۰ mood جهت نمایش دامنه زمانی، Constate نگردید.

تأثیر عوامل مختلف مؤثر بر مقدار THAP (نیز) بررسی گردید. این عوامل مؤثر، انجام آزمایشات و نتایج آنها نیز ارائه می‌شوند.

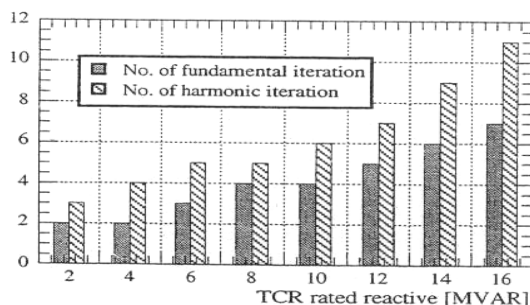
### 1-5 TCR rated VAR (نسبت به VAR)

از شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود که THAP با (TCR rated VAR) بیشتر از Proportional افزایش می‌یابد. این تحقیق همچنین با TCR متصل به bus نیز انجام شد.

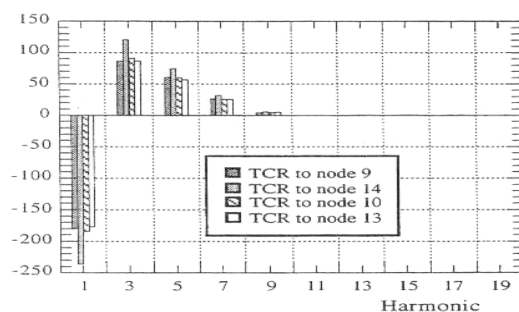


شکل ۷- تغییرات قدرت اکتیوی اصلی (اساسی) با TCR نسبت بندی شده راکتیو

همان طور که انتظار می‌رفت تعداد تکرارهای لازم جهت دست یافتن به راه حل نهایی، به طور معنی‌داری با TCR rated reactive افزایش می‌یابد. نتایج در شکل ۸ ارائه شده است، که تعداد تکرارهای اصلی مطابق است با مرحله (j) از بخش ۲ و تعداد تکرارهای هارمونیک‌های مطابق با مرحله (ii) از بخش ۲ می‌باشد.



شکل ۸- اثر TCR نسبت بندی شده راکتیو بر همگرایی جریان بار (گیری) هارمونیک



شکل ۹- تغییرات طیف قدرت اکتیو با محل TCR

### 2.5 محل TCR در شبکه

با در نظر گرفتن یک راکتور TCR با  $5\text{MVAR}$ ،  $\delta = 45^\circ$  در محل‌های مختلفی در شبکه، همان‌گونه که در شکل ۲ ارائه شده است، ممکن است که مشاهده شود که THAP دارای حساسیت ویژه‌ای نسبت به محل TCR می‌باشد و در



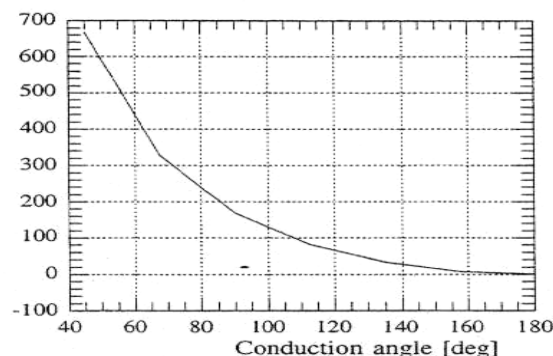
نتیجه امپدانس سیستم از نقطه کوپلینگ آن مشاهده می‌شود. با اینحال قدرت‌های هارمونیک مختلف تقریباً نسبت‌های وزنی یکسانی را برای محل‌های TCR آزمایش شده حفظ می‌نمایند.

گاهی تصور می‌شود که بزرگترین آلودگی، هنگامی رخ می‌دهد که عنصر غیرخطی (منبع هارمونیک)، جایی در نزدیکی ذخیره خازن bank capacitor می‌گیرد. نتایج حاصله تأیید می‌کنند که گستردگی (آلودگی) بسته به امپدانس سیستم هم ارز از نقطه کوپلینگ بیشتر از مجاورت (نزدیکی) کاپاسیتور مشاهده می‌شود. برای انگیزش این (موضوع) می‌توانیم بسادگی نتایج را برای حالت یک TCR تا  $node\ n^{\circ}9$  که به یک bank capacitor متصل می‌شود را با حالتی مقایسه کنیم که یک TCR تا  $node\ n^{\circ}14$  می‌باشد.

### ۳. زاویه انتقالی Thyristor

رابطه تزریق قدرت اکتیو با زاویه انتقالی Thyristor برای حالت اصلی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند که یک افزایش قابل توجهی با زاویه انتقالی کاهشی، آشکار می‌باشد.

حال می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت تعامل قدرت میان یک TCR و شبکه، قویاً (شدیداً) بستگی به محل TCR در شبکه و شرایط عملیاتی آن دارد. اینچنین دسته‌بندی نمی‌تواند با استفاده سنتی از عامل قدرت، مورد واکنش قرار گیرد.



شکل ۱۰ کل تغییرات قدرت اکتیو هارمونیک با زاویه انتقال Thyristor

$$PF = \frac{P}{S} \quad (20)$$

که دارای مقدار صفر برای تمام حالت‌های مذکور در فوق می‌باشد. یک مقدار گویاتر برای این نوع از تجزیه و تحلیل ممکن است عامل جابجایی مطرح شده برای استفاده گروه کاری IEEE در وضعیت غیرخطی باشد [۵]

$$dF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1 + Q_1}} \quad (21)$$

که در آن  $P_1$  و  $Q_1$  قدرت اصلی اکتیو و راکتیو،  $S_1$ : قدرت ظاهری اصلی می‌باشد.

تجزیه و تحلیل دیگر، برای مشخص کردن رابطه آن در مطالعات کیفی قدرت می‌باشد. برای حالت راکتورهای سوئیچ شده یک مقدار دیگر نیز به نظر می‌رسد که واقعاً حائز اهمیت باشد: افت قدرت ویژه TCR که به عنوان نسبت THAP محاسبه می‌شود و قدرت TCR را نرخ (نسبت) بندی می‌نماید:

$$SPL = \frac{THAP}{Q_1} = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} P_h}{Q_1} \quad [W / VAR] \quad (22)$$

افت قدرت ویژه TCR برای عامل جایگزین TCR مستقل نمی‌باشد زیرا:

$$dF = \frac{SPL}{\sqrt{(SPL)^2 + 1}} \quad (23)$$

مستقل از هر تئوری قدرت و ورای رابطه جدلی و مورد تردید (نامعلوم) قدرت راکتیو در حالت‌های غیرسینوسی، تأکید می‌شود که با افزایش ساده (نمونه‌ای) این مقدار، توسط قیمت انرژی، می‌توانیم به یک هزینه بهره‌برداری (برحسب افت قدرت) از VAR سوئیچ شده برسیم. آشکار است که مقدار آن وابستگی شدیدی به وضعیت‌های عملیاتی TCR دارد و بنابراین نوعی از یک حالت بخصوص می‌باشد اما با اینحال می‌تواند خیلی مفید باشد.

## ۶- نتایج

این مقاله تجزیه و تحلیل تعامل TCR - شبکه را براساس روش قدرت ارائه می‌نماید. به طور تحلیلی اثبات شده است که این عنصر موقعیت مناسبی را برای یک جریان قدرت اکتیو ایجاد می‌کند. این (عنصر) یک قدرت اکتیو را در فرکانس عملیاتی شبکه «جذب می‌کند» که کلاً به صورت قدرت‌های اکتیو هارمونیک به شبکه باز می‌گردد. از آنجا که در هر هارمونیک، قدرت اکتیو شبکه متوازن می‌شود، THAP، کل افت هارمونیک شبکه‌ای را ایجاد می‌کند که با عنصر غیرخطی بودن تعیین می‌شود و شامل رخداد یک نظام غیرسینوسی می‌باشد.

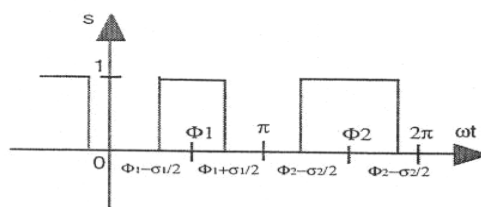
تأثیر عناصر مختلف بر بزرگی (مقدار) THAP نیز با شبیه‌سازی در سیستم IEEE 14bus مورد مطالعه قرار گرفته است (در یک نظام متوازن) به حساسیت شدیدی از مقدار THAP به محل (موقعیت) TCR در شبکه نیز توجه و دقت می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که عامل قدرت برای تجزیه و تحلیل کیفی قدرت از تعامل شبکه - TCR بی‌فایده (بدون استفاده) می‌باشد بنابراین این عامل جایگزین است که باید برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد، زیرا عامل سنتی قدرت برای تمام وضعیت‌های عملیاتی TCR مقداری خنثی دارد (یا بی‌اثر)

بالاخره، براساس مقدار THAP، هزینه عملیاتی (برحسب قیمت افت یا خسارت) یک VAR سوئیچ شده می‌تواند محاسبه (تعریف) گردد، بسته به اینکه محل TCR در شبکه و نیز موقعیت‌ها (شرایط) عملیاتی آن چه باشد.

## ۷ - ضمیمه (پیوست) ۱

### تعبیر جریانی TCR

$i_R(t)$ ، جریان در داخل راکتور عبارتست از انتگرال ولتاژ در میان راکتور  $V_R(t)$ . این ولتاژ می‌تواند با حاصل ضرب ولتاژ ایجاد شده  $V_s(t)$  و تابع سوئیچینگ TCR،  $S(t)$  ارائه شده در شکل ۱۱ بدست آید.



شکل ۱۱- تابع سوئیچینگ Thyristor

می‌توانیم ولتاژ ایجاد شده و تابع سوئیچینگ را با سری فوریه مجموع آنها بیان نمائیم:

$$V_s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} V_s^{(m)} e^{jm\omega t} \quad (24)$$

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S^{(n)} e^{jn\omega t}$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
V_{sm} &= -\frac{j}{2} U_s^{(m)} e^{j\phi_m} \\
S_0 &= \frac{1}{2\pi} (\sigma_1 + \sigma_2) \\
S_n &= \frac{1}{\pi} \left[ e^{-jn\phi_1} \sin \frac{n\sigma_1}{2} + e^{-jn\phi_2} \sin \frac{n\sigma_2}{2} \right]
\end{aligned} \tag{25}$$

که  $U_s^{(m)}$  و  $\phi_m$  مقادیری بزرگ هستند و زاویه فازي هارمونیک  $m$  ام از سری فوریه حقیقی  $VS(t)$ :

$$v_s(t) = \sum_{m=1}^{\infty} U_s^{(m)} \sin(m\omega t + \phi_m) \tag{26}$$

در تناوب انتقالی Thyristor هم ارز زیر  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$  و  $\pi$  لحظات اشتعال Thyristor منتقل شده  $\phi_1 - \delta_1 / 2 = \phi_2 - \delta_2 / 2 - \pi$  فرض خواهد شد. ولتاژ در میان اینداکتور، که در دامنه زمانی عبارتست از حاصل ضرب  $V_R(t) = V_s(t)S(t)$  می تواند در دامنه فرکانسی با حاصل ضرب حلقه‌ای Convolution بیان شود:

$$V_R^{(m)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_s^{(k)} S^{(m-k)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_s^{(m-k)} S^{(k)} \tag{27}$$

هر جزء از جریان رآکتور از سری فوریه مجموع:

$$i_R(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_R^{(m)} e^{jm\omega t} \tag{28}$$

می تواند از معادله زیر بیان شود:

$$I_R^{(m)} = \frac{1}{jm\omega L_R} V_R^{(m)} \tag{29}$$

که دامنه فرکانس انتگرال دامنه زمانی برای فاصله‌های انتقال Thyristor می باشد. با استفاده از (۲۸)،

(۲۹)، (۳۰) و جریان رآکتور (۱۱) حاصل می شود:

$$i_R = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{jm\omega L_R} \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_s^{(k)} \frac{2 \sin \frac{(m-k)\sigma}{2}}{\pi(m-K)} e^{jm(\omega t - \phi)} \tag{30}$$

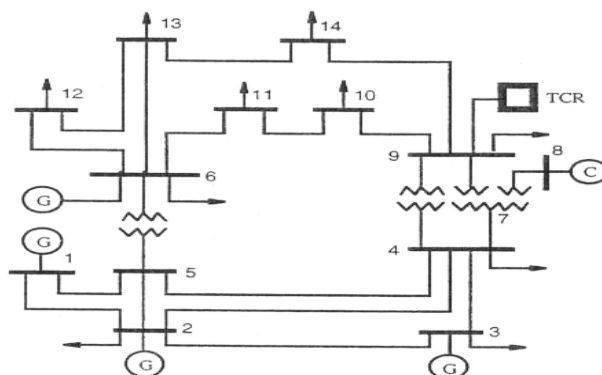
۸- ضمیمه ۲

#### سیستم آزمایشی: سیستم IEEE 14- BUS اصلاح شده

برای یک حالت آزمایشی در رابطه با یک TCR همراه با یک راکتیو نسبت بندی شده از Q[MVAR] که در node "n" قرار گرفته، سیستم IEEE 14 – bus بترتیب زیر اصلاح می شود:

بار متصل به 'n' node در سیستم اصلی قدرت راکتیو آن را با Q [MVAR] کاهش می دهد و در عرض یک TCR از Q[MVAR] راکتیو نسبت بندی شده متصل می شود. بنابراین برای حالت اصلی، بار خطی از؛ node n قدرت اکتیو یکسانی را خواهد داشت همانند سیستم IEEE 14 bus اصلی که 29,5MW و یک قدرت راکتیو 6,6MVAR

می‌باشد. برای نزدیکی (و مجاورت) با این بار، یک 10MVAR نسبت‌بندی شده TCR راکتیو متصل می‌شود. و سیستم با یک روش مشابه برای تمام حالت‌های دیگر اصلاح می‌گردد.



شکل ۱۲- سیستم IEEE14-Bus اصلاح شده

۹- مراجع

1- Arrillaga J., J. Gonzales and J. Cidras (1995)

"Iterative Harmonic Simulation of a Thyristor Controlled Reactor and a Power Transmission System", *EPE 1995 Conference Proceedings Vol2, Sevilla*,

2- Bohmann, L.J. and R.H. Lasseter (1989),

"Harmonic Interactions in Thyristor Controlled Reactor Circuits", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.4, No.3, July 1989

3- CIGRE Task Force 38-01-02 (1986), Static Var Compensators

4- IEEE Task Force on Harmonics Impacts (1993). Effects of Harmonics on Equipment, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.8, No.2, April 1993

5- IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations (1996), Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads : A Discussion, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No.3, January 1996

6- Miller T.J.E.(1982) , Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley & Sons Inc., New York

7- Rico J.J., E. Acha and T.J.E Miller (1986), Harmonic Domain Modelling of Three Phase Controlled Reactors by Means of Switching

Vectors and Discrete Convolutions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No.3

8- Xu W. , J.R Marti and H.W. Dommel (1991a), Harmonic Analysis of Systems with Static compensators, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.6, No. 1, February 1991

9- Xu W., LR Marti and H.W. Dommel (1991b) A Multiphase Harmonic Load Flow Technique, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.6, No.1, February 1991

10- Yacamini R. and LW. Resende (1986), Thyristor Controlled Reactors as harmonic Sources in HVDC Converter Stations and AC Systems, *IEE Proceedings*, Vol.133, Pt.13, No.4, July 1986