

بررسی اثر تغییر تپ چنجر ترانسفورماتور قدرت بر پایداری ولتاژ و حد بارپذیری شبکه

حسین اصغرپور علمداری و کوروش فتاحی و محمد قربانی

چکیده

پایداری ولتاژ از توانایی یک سیستم قدرت در نگهداری ولتاژ دائمی در همه باس‌های سیستم بعد از بروز اغتشاش در شرایط مشخصی از بهره‌برداری می‌باشد. اغتشاش ممکن است خروج ناگهانی یکی از تجهیزات یا افزایش تدریجی بار باشد. هنگامی که توان الکتریکی انتقالی به بار رو به افزایش بوده تا بتواند بار اضافه‌شده را تأمین کند و در همین حال، هر دو مؤلفه‌ی توان و ولتاژ قابل کنترل بمانند، سیستم قدرت پایدار ولتاژ خواهد بود و چنانچه سیستم بتواند بار الکتریکی را منتقل کند و ولتاژ از دست برود سیستم ناپایدار ولتاژ است. از آنجایی که تغییرات تپ ترانسفورماتورها در شبکه قدرت تأثیر به‌سزایی در کنترل ولتاژ و تغییر حاشیه پایداری ولتاژ یک شبکه قدرت با توپولوژی مشخص و معین دارد در این مقاله به بررسی و آنالیز حاشیه پایداری ولتاژ و حد بارپذیری سیستم انتقال قدرت در حالت تغییر تپ ترانسفورماتور پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پایداری ولتاژ، حد بارپذیری، ترانسفورماتور قدرت، تپ چنجر

۱. مقدمه

با تغییر ساختار جدیدی که در سال‌های اخیر در سیستم‌های قدرت پدید آمده و باعث شده که واحدهای تولیدی، توان الکتریکی بیشتری را از خطوط انتقال عبور دهند، به همین دلیل انتظار می‌رود شاهد فروپاشی ولتاژ گسترده‌تر و بیشتر سیستم‌های قدرت باشیم. برای مثال عبور توان بیش از حد یک خط انتقال باعث افت ولتاژ بیش از حد و کاهش ظرفیت انتقال توان الکتریکی به بخش مشخصی از سیستم قدرت می‌گردد [۱]. تعریف IEEE از پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی یک سیستم قدرت در نگهداری ولتاژ دائمی در همه‌ی باس‌های سیستم بعد از بروز اغتشاش در شرایط مشخصی از بهره‌برداری [۲]. اغتشاش ممکن است خروج ناگهانی یکی از تجهیزات یا افزایش تدریجی بار باشد. هنگامی که توان الکتریکی انتقالی به بار رو به افزایش است تا بتواند بار اضافه‌شده را تأمین کند (بار ممکن است مکانیکی، حرارتی یا روشنایی باشد)، و هر دو مؤلفه یعنی توان و ولتاژ قابل کنترل بمانند، سیستم قدرت پایدار ولتاژی و چنانچه سیستم بتواند بار الکتریکی را منتقل کند و ولتاژ از دست دهد سیستم ناپایدار ولتاژ خواهد بود. فروپاشی ولتاژ هنگامی رخ می‌دهد که افزایش بار باعث غیرقابل کنترل شدن ولتاژ در ناحیه مشخصی از سیستم قدرت گردد. بنابراین ناپایداری ولتاژ در طبیعت خود یک پدیده ناحیه‌ای است که می‌تواند به صورت فروپاشی ولتاژ کلی بدون هیچ پاسخ سریعی بدل گردد [۳]. افزایش توان راکتیو تزریقی نیز باعث افزایش حساسیت حاشیه امنیت ولتاژ نسبت به تغییرات ولتاژ در نقطه فروپاشی ولتاژ می‌گردد و این افزایش و نیز اصلاح الگوی بار راهکارهای مناسبی به منظور افزایش حد بارپذیری سیستم می‌باشند. مسائل کنترل و پایداری ولتاژ مسائل جدیدی در صنعت برق نیستند [۴]. امروزه گرایش به سمت استفاده از سیستم‌های قدرت تجدیدساختاریافته بیشتر شده، لذا هر روز نیاز به دستیابی آزاد به سیستم‌های انتقال برای مسیریابی انتقال انرژی بیشتر می‌شود. در این صورت برخی از واحدهای تولید و خطوط انتقال بارگذاری بیشتری می‌شوند و ممکن است قسمت‌هایی از سیستم قدرت تحت فشار (استرس) قرار گیرند [۵]. پایداری سیستم قدرت را می‌توان به طور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می‌سازد تا تحت وضع عادی، در حالت تعادل باقی بماند و در صورتی که تحت تأثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجدداً حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد [۶].

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام باس‌های سیستم در شرایط عادی عملکرد و شرایط تحت اغتشاش. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیرقابل کنترل در ولتاژ گردد سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضاست [۷-۸].

پایداری ولتاژ و حد بارپذیری در یک سیستم قدرت به عواملی مانند مقدار و الگوی توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شین‌ها، ساختار شبکه و الگوی بار بستگی دارد. با تغییر دادن هر یک از عوامل ذکر شده می‌توان حد بارپذیری سیستم قدرت را افزایش داد. تغییر ساختار شبکه به راحتی امکان پذیر نبوده و هزینه بر می‌باشد، از این رو روش یادشده در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت استفاده می‌شود. افزایش توان راکتیو تزریقی نیز باعث افزایش حساسیت حاشیه امنیت ولتاژ نسبت به تغییرات ولتاژ در نقطه فروپاشی ولتاژ می‌گردد، این افزایش و نیز اصلاح الگوی بار راهکارهای مناسبی به منظور افزایش حد بارپذیری سیستم می‌باشند که در جهت افزایش حد بارپذیری سیستم قدرت از روشی برای تغییر الگوی تزریق توان راکتیو به سیستم استفاده شده است [۹]. در مراجع [۱۰-۱۱] با هماهنگ کردن منابع توان راکتیو و جابجایی بهینه آن‌ها به بهبود پایداری ولتاژ شبکه پرداخته شده است. در مرجع [۱۲] برای بالا بردن حد بارگذاری شبکه از روش گسترش خطوط انتقال استفاده شده است. در مرجع [۱۳] از تغییر آرایش سیستم‌های توزیع شعاعی به منظور افزایش حد بارپذیری سیستم استفاده شده است و در مرجع [۱۴] اصلاح الگوی تولید با استفاده از آنالیز حساسیت به منظور بالا بردن حاشیه پایداری ولتاژ شبکه انجام شده است ولی این کار به صورت زمان حقیقی انجام نشده و دارای سرعت محاسباتی پایینی می‌باشد. از این رو در این مقاله به بررسی تأثیر تغییر تپ‌چنجر ترانسفورماتور بر حد بارپذیری و حاشیه پایداری ولتاژ یک شبکه انتقال قدرت پرداخته خواهد شد.

۲. پایداری ولتاژ

به میزان توانمندی سیستم قدرت در حفظ و نگهداشت دامنه ولتاژ شین‌های خود در برابر افزایش بار مصرفی، پایداری استاتیکی ولتاژ گفته می‌شود. افزایش حد بارپذیری سیستم قدرت که بیانگر حداکثر بار تحمیلی به یک سیستم قدرت می‌باشد به عنوان شاخصی از ارزیابی درجه ایمنی سیستم قدرت در نظر گرفته می‌شود. حد بارپذیری سیستم قدرت به عواملی مانند مقدار و الگوی توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شین‌ها، ساختار شبکه و الگوی بار بستگی دارد. با تغییر دادن هر یک از عوامل ذکر شده می‌توان حد بارپذیری سیستم قدرت را افزایش داد. تغییر ساختار شبکه به راحتی امکان پذیر نبوده و هزینه بر می‌باشد و از اینرو روش یاد شده در برنامه‌ریزی‌های بلند مدت استفاده می‌شود. افزایش توان راکتیو تزریقی نیز باعث افزایش حساسیت حاشیه امنیت ولتاژ نسبت به تغییرات ولتاژ در نقطه فروپاشی ولتاژ می‌گردد و این افزایش و نیز اصلاح الگوی بار راهکارهای مناسبی به منظور افزایش حد بارپذیری سیستم می‌باشند. امروزه مسائل کنترل و پایداری ولتاژ در بسیاری از سیستم‌ها مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. بطوری‌که در سالهای اخیر، ناپایداری ولتاژ موجب بروز چند فروپاشی عظیم در شبکه‌های مختلف گردیده است به همین دلیل امروزه عبارت فروپاشی «ولتاژ ناپایدار» در بحث‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، بیشتر از گذشته مشاهده می‌شوند. ماهیت ناپایداری ولتاژ در خطوط انتقال با توزیع، کمی متفاوت است، بروز اغتشاش مانند خروج یک خط انتقال، موجب کاهش فزاینده و غیر قابل کنترل ولتاژ گشته تا نهایتاً ولتاژ به ناحیه شکست بهمنی خود نزدیک شده و فروپاشی ولتاژ رخ می‌دهد که در این بررسی پدیده دینامیکی فروپاشی ولتاژ بصورت استاتیکی مورد بحث قرار گرفته است. لذا با استفاده از روشهای استاتیکی مانند پخش بار به تحلیل ناپایداری ولتاژ پرداخته می‌شود [۱۳].

از آنجایی که مدل‌های مختلف بار الکتریکی در شبکه از جمله عوامل مهم در کنترل ولتاژ و توان راکتیو می‌باشند بنابراین می‌توانند نقش به سزایی در پایداری استاتیکی ولتاژ داشته باشند. در این قسمت از شاخص مینیمم مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار که معادلات آن در روابط زیر آمده است به تعیین حاشیه پایداری ولتاژ پرداخته می‌شود [۱۳].

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (1)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2)$$

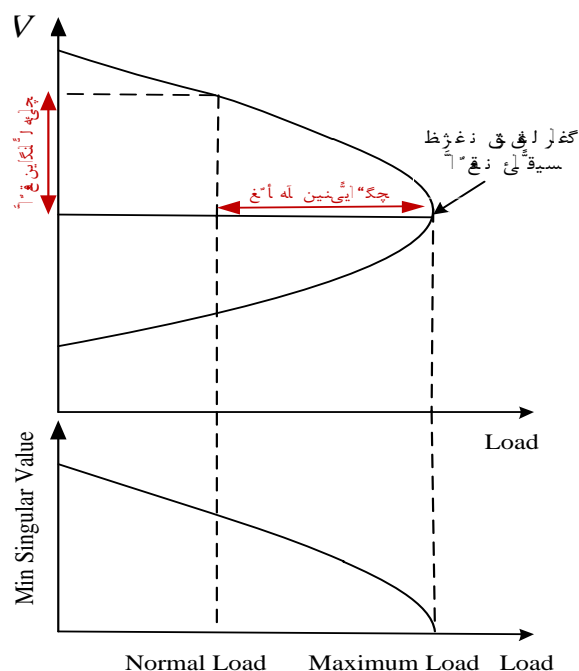
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

که در روابط بالا داریم :

ΔP : تغییرات کوچک توان اکتیو، ΔQ : تغییرات کوچک توان راکتیو، J_1 تا J_4 : عناصر ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار

$\Delta \delta$: تغییرات کوچک زاویه ولتاژ و $\Delta |V|$: تغییرات کوچک اندازه ولتاژ.

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود مینیمم مقدار ویژه‌ی ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار در نقطه‌ی فروپاشی ولتاژ به مقدار صفر نزدیک می‌شود. از این رو می‌توان از این شاخص به عنوان معیاری جهت تعیین حد بارپذیری سیستم استفاده نمود.



شکل ۱ - تغییرات مینیم مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین در نقطه‌ی فروپاشی ولتاژ

۳. مدلسازی بار در مطالعات پایداری ولتاژ

با توجه به اینکه هدف این مقاله نشان دادن تأثیر مدلسازی بار روی نتایج مطالعات پایداری است، دو مدل دینامیکی مختلف برای بار در نظر گرفته شده است: مدل بار دینامیکی وابسته به ولتاژ و بار موتور القایی.

۳-۱- مدل بار دینامیکی وابسته به ولتاژ

مدل بار دینامیکی وابسته به ولتاژ توسط معادلات دیفرانسیل مرتبه اول برای توانهای حقیقی و راکتیو بصورت روابط (۴) و (۵) بیان می‌شود [۱۴]. در این معادلات T_q, T_p به ترتیب ثابت زمانی توانهای حقیقی و راکتیو بار و x_q, x_p متغیرهای حالت بار هستند که به صورت روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$T_p \cdot \dot{x}_p = -x_p + p_s(v) - p_t(v) \quad (4)$$

$$T_q \cdot \dot{x}_q = -x_q + q_s(v) - q_t(v) \quad (5)$$

$$x_p = P_d - P_t(v) \quad (6)$$

$$x_q = Q_d - q_t(v) \quad (7)$$

P_d, Q_d به ترتیب نشان دهنده تقاضای توان حقیقی و راکتیو می‌باشند. و $p_s(v), q_s(v), p_t(v), q_t(v)$ به ترتیب مشخصه‌های توان اکتیو و راکتیو حالت دائم مشخصه‌های توان حقیقی و راکتیو در حالت گذرا می‌باشند که تابعیت آنها با ولتاژ

بصورت روابط (۸) تا (۱۱) در نظر گرفته می‌شود. در این روابط q_0, p_0 به ترتیب توان حقیقی و راکتیو بار در ولتاژ v_0 می‌باشند. نماهای موجود در این روابط برای ترکیب‌های مختلف انواع بار در محدوده‌های رابطه (۱۲) قرار می‌گیرند [۱۴].

$$p_s(v) = p_0(v/v_0)^{nps} \quad (۸)$$

$$p_t(v) = p_0(v/v_0)^{npt} \quad (۹)$$

$$q_s(v) = q_0(v/v_0)^{nps} \quad (۱۰)$$

$$q_t(v) = q_0(v/v_0)^{npt} \quad (۱۱)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq nps \leq 3 & \quad 1.5 \leq npt \leq 2.5 \\ 0 \leq nqs \leq 7 & \quad 4 \leq nqt \leq 7 \end{aligned} \quad (۱۲)$$

ثابت زمانی‌ها نیز با توجه به ترکیب‌های مختلف انواع بار می‌توانند در محدوده چند صدم ثانیه تا چند دقیقه و حتی تا چند ساعت قرار گیرند. به منظور بررسی میرایی سیستم در پی اختلال‌های کوچک می‌توان معادلات غیر خطی (۴) و (۵) را حول نقطه کار خطی نمود. با انتقال این معادلات خطی شده به حوزه فرکانس، توابع تبدیل بار به صورت زیر بدست می‌آیند [۱۴]. با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) می‌توان تابع انتقال $\frac{\Delta V}{\Delta S_d}$ را نیز به صورت رابطه (۱۷) بدست آورد:

$$G_{ps}(s) = \frac{\Delta P_d}{\Delta V} = \left(\frac{p_0}{v_0} \right) \left(\frac{npt.T_p.s + nps}{T_p.s + 1} \right) \quad (۱۳)$$

$$G_{qs}(s) = \frac{\Delta Q_d}{\Delta V} = \left(\frac{q_0}{v_0} \right) \left(\frac{nqt.T_q.s + nqs}{T_q.s + 1} \right) \quad (۱۴)$$

$$\Delta S_d = \frac{p_0}{s_0} \Delta P_d + \frac{q_0}{s_0} \Delta Q_d \quad (۱۵)$$

$$\frac{\Delta S_d}{\Delta V} = \frac{p_0}{s_0} \frac{\Delta P_d}{\Delta V} + \frac{q_0}{s_0} \frac{\Delta Q_d}{\Delta V} \quad (۱۶)$$

$$\frac{\Delta S_d}{\Delta V} = \frac{p_0}{s_0} G_{ps}(s) + \frac{q_0}{s_0} G_{qs}(s) \quad (۱۷)$$

۳-۲- مدل بار موتور القائی

مدل مرسوم درجه پنجم ماشین القائی در مختصات ω_e بصورت پریونیته به صورت زیر است [۱۴]:

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} = -r_s i_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_s} \psi_{qs} + v_{ds} \quad (18)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -r_s i_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_s} \psi_{ds} + v_{qs} \quad (19)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{dr}}{dt} = -r_r i_{dr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_s} \right) \psi_{qr} \quad (20)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qr}}{dt} = -r_r i_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_s} \right) \psi_{dr} \quad (21)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = -T_l + (\psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr}) \quad (22)$$

که در آن ω_s سرعت سنکرون و ω_e سرعت زاویه‌ای مرجع اختیاری می‌باشد. اگر فرکانس چرخش مختصات مرجع، همان سرعت سنکرون در نظر گرفته شود و از مقاومت استاتور و دینامیک سیم پیچ‌های استاتور صرف نظر گردد، تعداد معادلات دیفرانسیل به سه کاهش می‌یابد:

$$0 = \psi_{qs} + v_{ds} \quad (23)$$

$$0 = -\psi_{ds} + v_{qs} \quad (24)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{dr}}{dt} = -r_r i_{dr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_s} \right) \psi_{qr} \quad (25)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qr}}{dt} = -r_r i_{qr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_s} \right) \psi_{dr} \quad (26)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = -T_l + (\psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr}) \quad (27)$$

۴. مدلسازی تپ چنجر ترانسفورماتور در مطالعات پایداری ولتاژ

در ترانسفورماتورهای با تغییر دهنده تپ، هنگامی که نسبت تبدیل دارای مقادیر اسمی است، ترانسفورماتور با ادمیتانس سری Y_t بر حسب pu نمایش داده می‌شود. با نسبت تبدیل غیر اسمی، ادمیتانس pu از دید دو سمت ترانسفورماتور متفاوت است، لذا ادمیتانس باید طوری اصلاح شود که اثر نسبت تبدیل غیر اسمی را منظور کند. ترانسفورماتوری را در نظر بگیرید که در آن ادمیتانس Y_t با یک ترانسفورماتور ایده‌آل مطابق شکل زیر، سری شده است. این آرایش نمایش دهنده نسبت تپ غیر اسمی $1:a$ می‌باشد. ادمیتانس Y_t بر حسب pu در مبنای نسبت دور اسمی بوده و a موقعیت تپ غیر اسمی بر حسب pu است که اجازه تنظیم ولتاژ را در محدوده $\pm 10\%$ درصد می‌دهد (مطابق شکل ۲). در ترانسفورماتورهای تغییر دهنده فاز، a یک عدد مختلط است. شین فرضی x را بین نسبت دور و ادمیتانس ترانسفورماتور در نظر بگیرید. با توجه به اینکه توان مختلط در هر دو

سمت ترانسفورماتور ایده آل یکسان است، چنانچه یک تغییر زاویه فاز مثبت در ولتاژ ایجاد شود یک تغییر زاویه فاز منفی در جریان بوجود می آید. بنابراین برای جهت‌های منظور شده جریان داریم:

$$V_x = \frac{1}{a} V_j \quad (28)$$

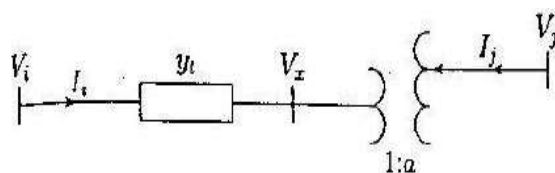
$$I_i = a \times I_j \quad (29)$$

جریان I_i از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_i = Y_t (V_i - V_x) \quad (30)$$

با جایگزینی V_x در رابطه اخیر خواهیم داشت:

$$I_i = Y_t V_i - \frac{Y_t}{a} V_j \quad (31)$$



شکل ۲- ترانسفورماتور با تنظیم تپ در $1:a$

همچنین با استفاده از رابطه (۲۹) داریم:

$$I_j = -\frac{1}{a} I_i \quad (32)$$

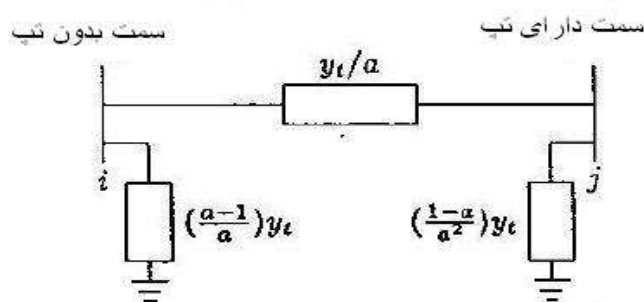
از رابطه (۳۱) خواهیم داشت: (با جایگزینی I_i)

$$I_j = -\frac{Y_t}{a} V_i + \frac{Y_t}{|a|^2} V_j \quad (33)$$

روابط (۳۱) و (۳۲) را می توان به شکل ماتریس زیر نوشت:

$$\begin{pmatrix} I_i \\ I_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_t & -\frac{Y_t}{a} \\ -\frac{Y_t}{a^*} & \frac{Y_t}{|a|^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} \quad (34)$$

در حالتی که a یک عدد حقیقی باشد مدل π نشان داده شده در شکل زیر ماتریس ادمیتانس معادله (۳۴) را نمایش می دهد در مدل π ، سمت چپ مربوط به سمت بدون تپ بوده و سمت راست مربوط به سمت دارای تپ ترانسفورماتور می باشد.



شکل ۳- مدار معادل ترانسفورماتور با تغییر دهنده تپ

۴-۱- اضافه نمودن تپ چنجر به مدل تونن ارائه شده

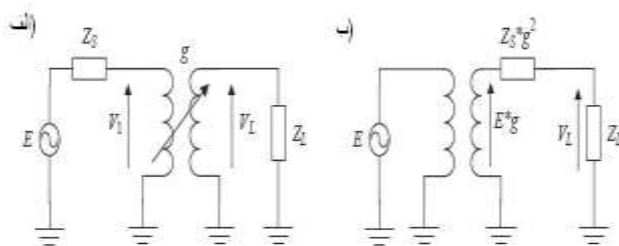
برای مدل تونن شکل (۴)، تنظیم ولتاژ با استفاده از تپ چنجر را می توان اضافه کرد. در این مدل تلفات سیم پیچ و هسته حذف شده اند. سطح ولتاژ ثانویه به موقعیت تپ چنجر (g) وابسته است؛ طبق معادله:

$$g = \frac{V_l}{V_1} \quad (35)$$

$$(36)$$

$$Z'_S = Z_S \times g^2, \quad E' = E \times g$$

برای حذف تپ چنجر از مدل ارائه شده، می توان پارامترهای تونن برای انواع سیم پیچ های ترانس را محاسبه نمود. امپدانس سیستم (Z_S) و منبع ولتاژ (E) می تواند به سیم پیچ دوم منتقل شوند (بر اساس فرمول (۳۶)). شکل (ب-۴) مدل تونن با پارامترهای محاسبه شده را نمایش می دهد.



شکل ۴- مدل تونن به همراه تپ چنجر

با به حساب آوردن نسبت ترانس در معادله ولتاژ (۳۵)، ولتاژ ثانویه بوسیله فرمول (۳۷) بیان شده و با معادلات (۳۵) و (۳۷) ولتاژ اولیه را می توان بصورت رابطه (۳۸) محاسبه کرد.

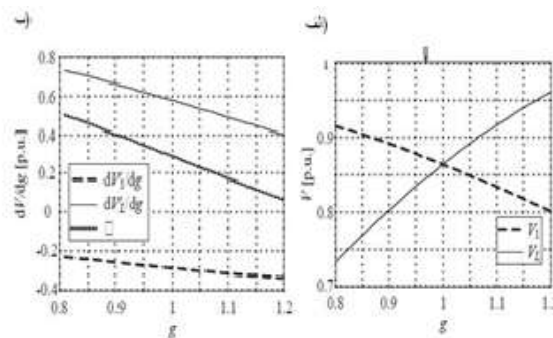
$$V_l = \frac{Eg}{\sqrt{1 + (Wg^2)^2 + 2Wg^2 \cos \beta}} \quad (37)$$

$$V_l = \frac{V_l}{V_g} = \frac{E}{\sqrt{1 + (Wg)^2 + 2Wg^2 \cos \beta}} \quad (38)$$

معادلات بالا نشان می دهند که تغییر موقعیت تپ چنجر، ولتاژ اولیه و ثانویه ترانس را تغییر می دهد. زمانیکه پارامتر (g) افزایش پیدا می کند، ولتاژ ثانویه افزایش و ولتاژ اولیه کاهش پیدا می کند. شکل (۵) نمونه ای از این رابطه را نشان می دهد. منحنی ها بر حسب این مقادیر رسم شده اند:

$$E=1, W=0.3, \varphi_{zs}=85^\circ, \varphi_{zl}=15^\circ$$

مشتق های ولتاژهای اولیه و ثانویه به نسبت ترانس g و جمع این مشتق ها در شکل (۵-ب) نشان داده شده اند



شکل ۵ - الف) تغییرات ولتاژ اولیه و ثانویه - ب) تغییرات مشتق های ولتاژ برای مقادیر (W=0.3, β=70°)

مشتق ولتاژ به نسبت g می تواند به عنوان معیار توقف کار تپ چنجر استفاده شود. توقف باید زمانی انجام شود که تغییر تپ چنجر تاثیر مطلوب را فراهم نکند. تپ چنجر زمانی باید متوقف شود که مشتق های ولتاژها برابر گردند. بنابراین عملکرد تپ چنجر زمانی مجاز است که شرط (۳۹) برقرار باشد. زمانی که این شرط برقرار نباشد، تغییرات نسبت g باعث کاهش بیشتری از ولتاژ اولیه نسبت به افزایش ولتاژ ثانویه خواهد شد. در چنین حالتی، معقول است که تپ چنجر متوقف شود.

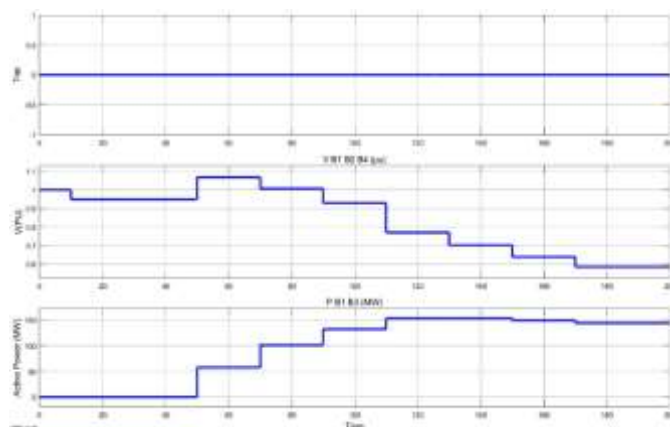
$$\frac{d V_l}{d g} + \frac{d V_l}{d g} > 0 \quad (39)$$

۵. نتایج حاصل از شبیه سازی

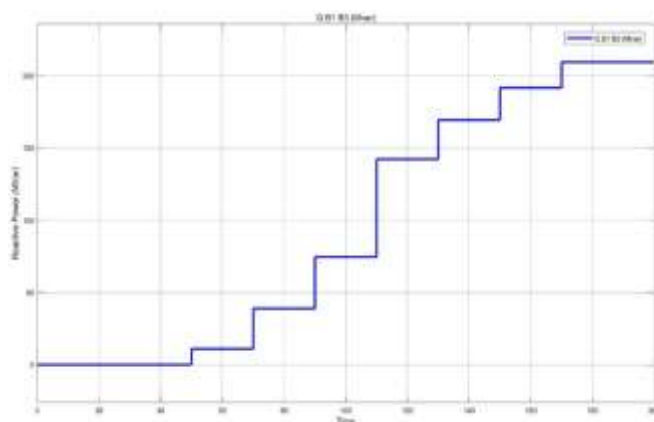
در این بخش جهت بررسی تأثیر تغییر تپ ترانسفورماتور بر پایداری ولتاژ در یک سیستم قدرت به شبیه سازی سیستم قدرت مشابه سیستم نشان داده شده در شکل (۶) پرداخته شده است. اجزای این شبیه سازی در این شکل نمایش داده شده است.

همانطور که در این شبیه سازی مشاهده می شود در فیدر ورودی این شبکه از یک ترانسفورماتور با قابلیت تغییر تپ چنجر زیر بار جهت تنظیم ولتاژ استفاده است. مشخصات این ترانسفورماتور در شکل (۶) نشان داده شده است.

در ادامه و در شکل های (۷) تا (۹) نتایج حاصل از شبیه سازی هنگامی که تپ ترانسفورماتور ثابت است و تغییر نمی نماید نشان داده شده. همانطور که در شکل مشاهده می شود در این مورد مطالعاتی فروپاشی ولتاژ بسیار آرام و غیر ناگهانی و در بار ۱۵۰ مگاوات و ولتاژ ۰/۶۵ پریونیت رخ می دهد که این موضوع بیانگر از آن است که حدبار پذیری با وجود ترانسفورماتورهای با قابلیت کنترل ولتاژ و تغییر تپ در زیر بار، بیشتر است و نیز فروپاشی ولتاژ در ولتاژ بالاتری اتفاق می افتد.



شکل ۹- نمودارهای تغییرات تپ، ولتاژ باس B2 و باراکتیو در شبکه مورد مطالعه در هنگام ثابت بودن تپ ترانسفورماتور



شکل ۱۰- نمودارهای تغییرات توان راکتیو در باس B2 هنگام افزایش بار در هنگام ثابت بودن تپ ترانسفورماتور

۶. نتیجه گیری

از آنجایی که خطوط انتقال دارای محدودیت های شدید انتقال توان، افت ولتاژ نسبتاً زیاد و تلفات قابل توجه می باشند، اطلاع از وضعیت سیستم و تعیین حد بارگذاری بسیار حائز اهمیت است. هنگامی که بار شبکه افزایش می یابد ولتاژ نیز همزمان با آن کاهش پیدا می کند به عبارتی دیگر ماکزیمم حد بارپذیری در یک سیستم قدرت رابطه ی نزدیکی با حاشیه پایداری ولتاژ در آن سیستم دارد که به لحاظ مفهوم ریاضی آن، این دو تعریف متناظر با مینیمم مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار در سیستم قدرت می باشند. در چنین حالتی، مینیمم مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار در نزدیکی های نقطه ی فروپاشی ولتاژ به مقدار صفر نزدیک می شوند. همانطور که در نتایج حاصل از شبیه سازی مشاهده می شود هرچه وابستگی بار به ولتاژ سیستم بیشتر باشد (به عبارتی بهتر با افزایش تعداد بارهای جریان ثابت و امپدانس ثابت سیستم)، حد حاشیه پایداری ولتاژ افزایش می یابد. و نیز حدبارپذیری با وجود ترانسفورماتورهای با قابلیت کنترل ولتاژ و تغییر تپ در زیر بار، بیشتر شده و فروپاشی ولتاژ در ولتاژ بالاتری اتفاق می افتد.

- [۱] N. G. Paterakis, A. Taşcıkaraoğlu, O. Erdinc, A. G. Bakirtzis, and J. P. Catalao, "Assessment of demand-response-driven load pattern elasticity using a combined approach for smart households," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. ۱۲, pp. ۱۵۲۹-۱۵۳۹, ۲۰۱۶.
- [۲] J. M. C. Ongpeng, W. C. Oreta, and S. Hirose, "Effect of load pattern in the generation of higher harmonic amplitude in concrete using nonlinear ultrasonic test," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. ۱۴, pp. ۲۰۵-۲۱۴, ۲۰۱۶.
- [۳] P. Malathy, A. Shunmugalatha, and T. Marimuthu, "Application of Differential Evolution for Maximizing the Loadability Limit of Transmission System During Contingency," in *Proceedings of Fifth International Conference on Soft Computing for Problem Solving*, ۲۰۱۶, pp. ۵۱-۶۴.
- [۴] S. Rajaram and S. Selvaperumal, "Computation of maximum loadability limit of a power system using parallel mutation particle swarm optimization (PMPPO)," in *Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, ۲۰۱۶ International Conference on, ۲۰۱۶, pp. ۳۲۷-۳۳۲.
- [۵] J. E. Tobón, J. M. Ramirez, and R. E. C. Gutierrez, "Tracking the maximum power transfer and loadability limit from sensitivities-based impedance matching," *Electric Power Systems Research*, vol. ۱۱۹, pp. ۳۵۵-۳۶۳, ۲۰۱۵.
- [۶] C. Vournas, "Maximum power transfer in the presence of network resistance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. ۳۰, pp. ۲۸۲۶-۲۸۲۷, ۲۰۱۵.
- [۷] P. Singh, L. Titare, L. Arya, and S. Choube, "On-line probabilistic voltage security assessment using Radial Basis Function neural network," in *ICT in Business Industry & Government (ICTBIG)*, International Conference on, ۲۰۱۶, pp. ۱-۶.
- [۸] M. Gholami, G. Gharehpetian, and M. Mohammadi, "Online Decision Tree based strategy for power system static security margin improvement using wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. ۸۳, pp. ۱۵-۲۰, ۲۰۱۶.
- [۹] X. Liu and X. Zhang, "Distributed Voltage Security Monitoring in Large Power Systems Using Synchrophasors," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. ۷, pp. ۹۸۲-۹۹۱, ۲۰۱۶.
- [۱۰] H. Chen, Y. Zhang, and H. Ngan, "Power System Reactive Power Optimization," *Power System Optimization: Large-Scale Complex Systems Approaches*, pp. ۱۸۹-۲۴۶, ۲۰۱۶.
- [۱۱] C. Vournas and T. Van Cutsem, "Online Voltage Security Assessment," in *Real-Time Stability in Power Systems*, ed: Springer, ۲۰۱۴, pp. ۳۰۵-۳۳۳.
- [۱۲] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, "Electrical power systems quality," New York, NY: McGraw-Hill, ۱۹۹۶, ۱۹۹۶.
- [۱۳] A. Ghosh and G. Ledwich, *Power quality enhancement using custom power devices*: Springer Science & Business Media, ۲۰۱۲.
- [۱۴] A. Ulbig, T. S. Borsche, and G. Andersson, "Impact of low rotational inertia on power system stability and operation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. ۴۷, pp. ۷۲۹۰-۷۲۹۷, ۲۰۱۴.
- [۱۵] R. Shah, N. Mithulananthan, R. Bansal, and V. Ramachandaramurthy, "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. ۴۱, pp. ۱۴۲۳-۱۴۳۶, ۲۰۱۵.