



مقاله علمی-ترویجی

## امکان سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰ کیلوولت ابوطالب - تربت جام

جواد مدرسین<sup>\*</sup>، مهندس برق، دانشگاه صنعتی قوچان، j.modarresi@qiet.ac.ir

عباداله کامیاب، مدیر دفتر تحقیقات و کنترل کیفیت تجهیزات، شرکت برق منطقه‌ای - خراسان، ebad.kamyab@gmail.com  
<sup>\*</sup>نویسنده مسئول

### چکیده

وقوع تشدید در خطوط انتقال می‌تواند باعث ایجاد اضافه ولتاژهای نامتعارف شده و تجهیزات را در معرض خطر قرار دهد. یکی از شرایطی که می‌تواند منجر به ایجاد تشدید در خطوط انتقال شود، وصل نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز) در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با راکتور موازی است. وصل نامتقارن خط می‌تواند ناشی از عدم عملکرد فازهای کلید، فعال بودن ریکلوزر تک‌فاز و یا وجود سوئیچ سنکرون در خط باشد. در این مقاله، امکان سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰ kV ابوطالب - تربت جام با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده در حالت وصل نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز) خط ابوطالب - تربت جام، تشدید در فرکانس قدرت اتفاق نمی‌افتد. اما این خط دارای فرکانس تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌ها است. برای بررسی تاثیر هارمونیک‌ها، مطالعات هارمونیک‌ی انجام گرفته و نشان داده می‌شود که هارمونیک‌ها نمی‌توانند اضافه ولتاژهای نامتعارف در این خط ایجاد نمایند.

**کلمات کلیدی:** تشدید، خط انتقال، راکتور موازی، وصل نامتقارن.

## Feasibility of Resonance in the 400 kV Abu Taleb-Torbat Jam Transmission line

Javad Modarresi<sup>\*</sup>, Department of Electrical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran, j.modarresi@qiet.ac.ir

Ebadollah Kamyab, Research and quality control office, Khorasan Regional Electricity Company, ebad.kamyab@gmail.com

<sup>\*</sup>Corresponding Author

### Abstract

Resonance in transmission lines can cause unusual over-voltages and put the equipment at risk. One of conditions that can lead to resonance in transmission lines is the asymmetrical connection (single-phase and two-phase) of transmission lines compensated by shunt reactor. The asymmetrical connection of the line can be caused by the failure of the circuit breaker, activation of the single-phase recloser, or the presence of switchsync relay. In this paper, the feasibility of resonance in the 400 kV Abu Talib-Torbat Jam transmission line is investigated using EMTP-RV software. According to the results, in the case of asymmetrical connection (single-phase and two-phase) of the Abu Talib-Torbat Jam transmission line, resonance does not occur in the power frequency. But this line has a resonant frequency in the range of harmonics. In order to investigate the effect of harmonics, harmonic studies have been conducted and it is shown that harmonics cannot cause unusual over-voltages in this line.

**Key words:** Resonance, Transmission line, Shunt reactor, Asymmetrical connection

به صورت خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲-۱- خطوط با راکتور موازی و وصل نامتقارن خط

تشدید می‌تواند در خطوط تک مداره و چند مداره در شرایطی که یک مدار به صورت نامتقارن (تک‌فاز و یا دو فاز) متصل شده باشد، ایجاد شود. اتصال نامتقارن خط می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

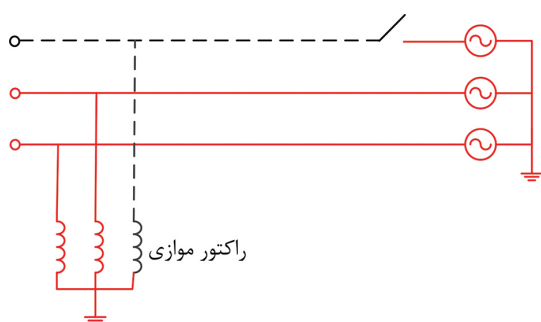
۱- فعال بودن ریکلوزرها بر روی کلیدهای ابتدا و انتهای خط؛

۲- خطای کلید در حالت وصل و یا قطع جریان؛

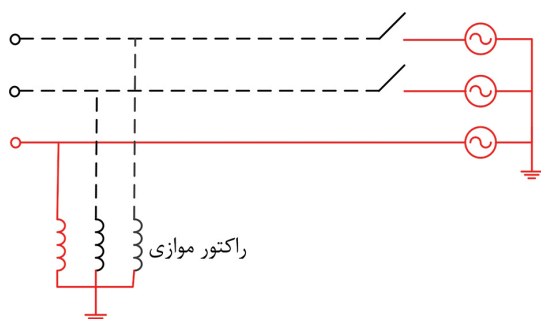
۳- استفاده از سوئیچ سنکرون در خطوط انتقال به منظور مقابله با اضافه ولتاژهای کلیدزنی.

با وصل نامتقارن خط، یک مدار تشدید سری بین راکتور فازهای قطع شده و ظرفیت خازنی‌های خط انتقال ایجاد می‌شود. به طور معمول با عملکرد سیستم‌های حفاظتی و یا سیستم‌های خودکار (نظیر ریکلوزرها و سوئیچ سنکرون‌ها)، وصل نامتقارن خط در مدت زمان کوتاهی از بین می‌رود. اما به دلیل اضافه ولتاژهای زیادی که تشدید می‌تواند ایجاد کند، امکان آسیب دیدن تجهیزات وجود دارد [۷].

در شکل (۱) مدارهایی که می‌توانند در حالت وصل نامتقارن باعث ایجاد تشدید شوند نشان داده شده است. با توجه به این شکل، شرط ایجاد تشدید در خطی که تنها در یک سمت آن راکتور موازی نصب شده است، این است که خط از سمت راکتور مدار باز بوده و از سمت دیگر به صورت نامتقارن متصل گردد [۷].



الف



ب

شکل ۱: ایجاد تشدید در خطوط جبران‌سازی شده با راکتور موازی: (الف) وصل نامتقارن دو فاز، (ب) وصل نامتقارن تک‌فاز

در شکل (۲)، مدار معادل وصل نامتقارن دو فاز نشان داده شده است. با صرف نظر کردن از فازهای *b* و *c* که توسط فرکانس اصلی سیستم قدرت تغذیه می‌شوند، یک مدار LC شامل راکتور فاز قطع شده و ظرفیت خازنی خط ایجاد می‌شود. این مدار ممکن است شرایط تشدید را داشته باشد و ولتاژ از مقدار نامی خود بسیار بالاتر رود.

در یک خط انتقال که با راکتور موازی جبران‌سازی شده است،

امروزه با گسترش شبکه‌های برق و نیاز به انتقال برق از محل تولید به محل مصرف، استفاده از خطوط انتقال بلند اموری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از مشکلاتی که در خطوط انتقال بلند ایجاد می‌شود، افزایش ولتاژ انتهای خط به دلیل اثر فرانتی است. از این رو، برای کاهش اثر فرانتی و کنترل ولتاژ انتهای خطوط بلند به طور معمول از راکتورهای موازی استفاده می‌شود [۱]. اگر چه وجود راکتورها در کاهش اضافه ولتاژها در شرایط کم‌باری و قطع بار بسیار مفید است، اما آن‌ها می‌تواند باعث ایجاد تشدید در خط انتقال شوند. برای به وجود آمدن تشدید، به طور معمول باید یک طرف خط باز بوده و خط از طرف دیگر به صورت نامتقارن به شبکه متصل شود [۵-۲].

تاکنون موارد متعددی از وقوع تشدید در ایران و جهان گزارش شده است که در آن‌ها ولتاژ بالای ایجاد شده به دلیل تشدید باعث صدمه دیدن تجهیزات شده است [۸-۶]. به طور مثال در زمستان ۱۳۹۳ یک مورد تشدید در برق منطقه‌ای اصفهان و در خط گلپایگان- اراک گزارش شده است که در آن به دلیل خطا در عملکرد قطع کلید، خط به صورت تک‌فاز از سمت اراک برق‌دار شده و ولتاژ راکتور تا  $1/25$  pu افزایش یافته است. این حادثه به دلیل عملکرد مناسب اپراتور پست گلپایگان و وصل خط از طرف گلپایگان خسارتی در پی نداشته است. در خط زاهدان- ایرانشهر نیز یک مورد تشدید گزارش شده است. در این حادثه ولتاژ تا  $1/15$  pu بالا رفته و به سیم‌پیچ راکتور آسیب وارد کرده است [۹]. در کشور کانادا و در سال ۲۰۱۲ یک مورد تشدید گزارش شده است که در این حادثه ولتاژ تا  $1/71$  pu بالا رفته و در مدت  $6/85$  ثانیه یک کلید و دو برق‌گیر آسیب دیده‌اند [۱]. با توجه به موارد گفته شده، وقوع تشدید در خطوط جبران‌سازی شده با راکتور موازی محتمل بوده و باید مورد توجه قرار گیرد.

هرچه فرکانس تشدید به فرکانس کاری شبکه نزدیک‌تر گردد، دامنه‌ی ولتاژ ایجاد شده به دلیل تشدید بیشتر خواهد بود [۱۰]. فرکانس تشدید و دامنه‌ی اضافه ولتاژ ایجاد شده به ساختار خط انتقال، نحوه‌ی تغذیه‌ی نامتقارن خط انتقال (تک‌فاز یا دو فاز) و ساختار راکتور نصب شده در انتهای خط بستگی دارد [۱۱-۱۳]. با وقوع تشدید و افزایش ولتاژ دو سر راکتور، هسته‌ی راکتور به اشباع رفته و امپدانس آن کاهش می‌یابد. کاهش امپدانس راکتور باعث جابه‌جایی فرکانس تشدید شده و می‌تواند دامنه‌ی اضافه ولتاژ ایجاد شده را تغییر دهد. در صورت وقوع تشدید در خط انتقال، باید اثر اشباع راکتور، پدیده‌ی کرونا و برق‌گیرها مورد مطالعه قرار گیرند [۷].

در این مقاله، امکان وقوع تشدید در خط  $400$  kV ابوطالب- تربت‌جام مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، وصل نامتقارن (تک‌فاز و دو فاز) خط در نرم‌افزار EMTP-RV شبیه‌سازی شده و در هر حالت عدم قطعیت فاصله‌ی هادی‌های فاز نسبت به زمین و تاثیر هارمونیک‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند در فعال‌سازی ریکلوزرهای  $400$  kV و همچنین استفاده از سوئیچ سنکرون‌ها در خط بیان شده بسیار مفید باشد.

## ۲- تشدید در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با راکتور موازی

ساختارهای مختلفی از خطوط انتقال می‌توانند منجر به تشدید شوند [۷]. در این بخش، ساختارهای مرتبط با موضوع مقاله

و رفع آن موضوعی مهم در حفظ امنیت سیستم قدرت است.

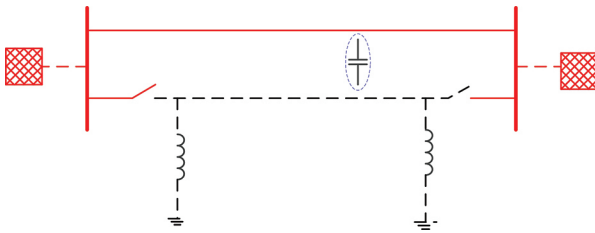
## ۲-۲- خطوط با راکتور موازی و کلیدزنی سه فاز

این حالت تنها در خطوط چند مداره وقتی اتفاق می افتد که یک مدار بی برق بوده و مدار دیگر برق دار باشد. به دلیل وجود القای ولتاژ خازنی بین مدارها، ولتاژی در مدار بی برق (مدار بی برق زمین نشده باشد) القا می شود. ولتاژ القا شده در حالت عادی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می شود:

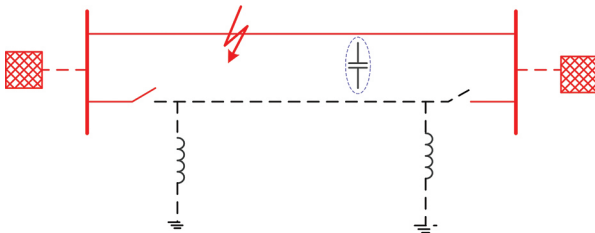
$$V_{\text{Circuit\_II}} = V_{\text{Circuit\_I}} \frac{C_s}{C_s + C_p} \quad (۸)$$

در این رابطه  $C_s$  ظرفیت خازنی بین دو مدار و  $C_p$  ظرفیت خازنی بین مدار بی برق و زمین است. در حالت عادی، مقدار ولتاژ القا شده در مدار بی برق برابر کسر کوچکی از ولتاژ مدار برق دار است. با نصب راکتور موازی، امکان ایجاد مدار تشدید به وجود می آید. در فرکانس تشدید و یا نزدیک آن مقدار ولتاژ القا شده در مدار بی برق می تواند به چندین برابر مقدار به دست آمده از رابطه‌ی (۸) برسد [۷].

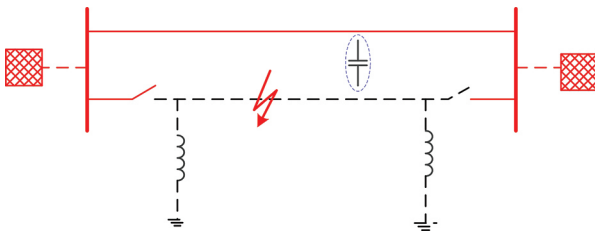
در شکل (۳)، سه مدار ایجاد تشدید در خطوط دو مداره نشان داده شده است. در حالت (الف) مدار جبران سازی شده بی برق است و با القای ولتاژ از طریق مدار برق دار، تشدید ایجاد می شود. در این حالت، مدار تشدید در حالت کار عادی شبکه ایجاد می شود. در حالت (ب) یک خطا در مدار برق دار اتفاق افتاده و باعث ایجاد مدار تشدید می شود. این مدار تشدید با رفع خطا از بین می رود. در حالت (ج) خطا در خط بی برق اتفاق افتاده و با رفع خطا مدار تشدید از بین می رود.



الف

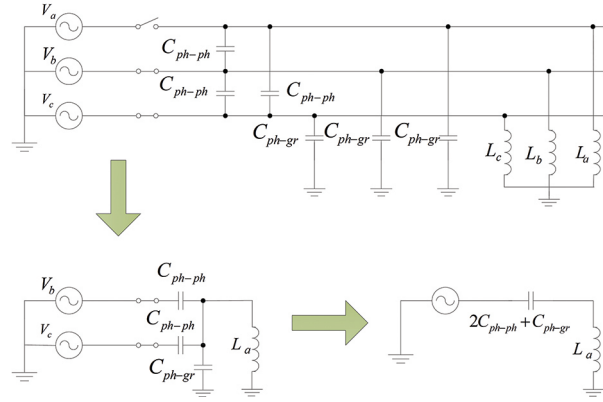


ب



ج

شکل ۳: مدار تشدید در خطوط چند مداره: (الف) حالت دائم، (ب) وقوع خطا در خط برقرار، (ج) وقوع خطا در خط بی برق



شکل ۲: مدار معادل برای تحلیل تشدید در حالت وصل نامتقارن دو فاز خط

ضریب جبران سازی خط  $K$  به صورت (۱) تعریف می شود [۱۴].

$$k = \frac{B_L}{B_C} = \frac{1/\omega L}{\omega C} = \frac{1}{\omega^2 L(C_{ph-gr} + 3C_{ph-ph})} \quad (۱)$$

با توجه به شکل (۲)، فرکانس تشدید مدار  $LC$  به دست آمده به صورت (۲) قابل محاسبه است.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{ph-gr} + 2C_{ph-ph})}} \quad (۲)$$

با ضرب صورت و مخرج (۲) در  $\sqrt{C_{ph-gr} + 3C_{ph-ph}}$  و کمی ساده سازی داریم:

$$f_0 = f \sqrt{\frac{1+3m}{1+2m}} k \quad (۳)$$

در (۲) فرکانس سیستم قدرت،  $f$  فرکانس تشدید و  $m$  به صورت (۴) محاسبه می شود.

$$m = \frac{C_{ph-ph}}{C_{ph-gr}} \quad (۴)$$

در حالت وصل نامتقارن دوفاز خط انتقال، اگر رابطه‌ی (۵) برقرار باشد، آنگاه  $f = f_0$  شده و ولتاژ به بی نهایت میل می کند.

$$k = \frac{1+2m}{1+3m} \quad (۵)$$

در حالتی که خط به صورت نامتقارن تک فاز وصل شده باشد، فرکانس تشدید به صورت (۶) به دست می آید [۱۴].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{ph-gr} + C_{ph-ph})}} = f \sqrt{\frac{1+3m}{1+m}} k \quad (۶)$$

در این حالت اگر رابطه‌ی زیر برقرار باشد،  $f = f_0$  شده و ولتاژ به بی نهایت میل می کند.

$$k = \frac{1+m}{1+3m} \quad (۷)$$

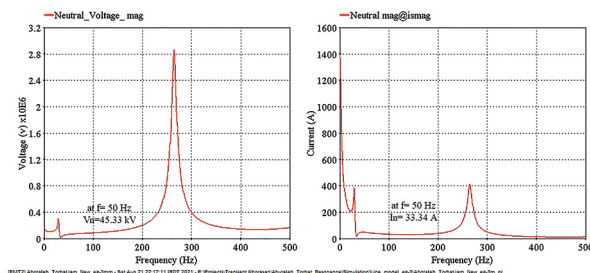
اضافه ولتاژ ناشی از تشدید تا وقتی که عدم تقارن در سیستم وجود دارد برطرف نمی شود و عایق خطوط، برق گیرها، راکتورهای موازی، ترانسفورماتورهای اندازه گیری و کلیدهای باز شده را تحت تنش الکتریکی قرار می دهد. بنابراین تشخیص به موقع عدم تقارن

راکتور و وصل نامتقارن خط (تک‌فاز و یا دو فاز) از سمت دیگر است. این حالت می‌تواند در باز و بست تک‌فاز و یا استفاده از سوئیچ سنکرون ایجاد شود. در نتیجه، وصل نامتقارن خط از سمت بست ابوطالب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روابط ارائه شده در بخش دوم برای خطوطی که دارای ساختار یکسان در تمامی طول خود هستند صادق است و در این مقاله به منظور فهم بیشتر پدیده‌ی تشدید ارائه شده‌اند. از این‌رو این روابط قابل اعمال به خط ابوطالب- تربت‌جام نیستند.

#### ۴-۱- وصل نامتقارن تک‌فاز

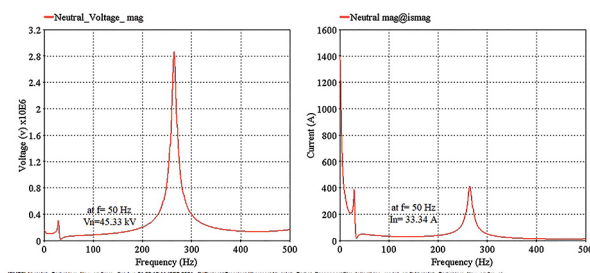
در شکل (۵)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن تک‌فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک‌ترین فرکانس‌های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس‌های ۲۹۲ و ۳۰ هرتز هستند.



شکل ۵: ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین در وصل نامتقارن تک‌فاز

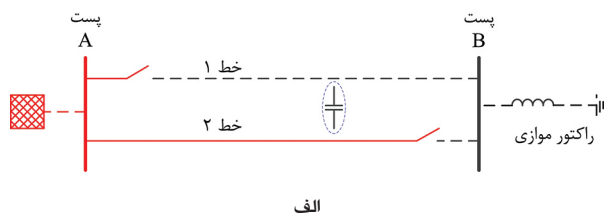
در شکل (۵)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن تک‌فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک‌ترین فرکانس‌های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس‌های ۲۹۲ و ۳۰ هرتز هستند. باند فرکانسی مطلوب که در آن ولتاژ کمتر از ۱/۰۵ pu است نشان داده شده است. این باند فرکانسی در محدوده‌ی ۹/۳۴ Hz تا ۸/۶۴ Hz قرار دارد. در نتیجه در فرکانس اصلی سیستم قدرت و محدوده‌ی مجاز تغییرات آن ( $\pm 0.3$  Hz) تشدید اتفاق نمی‌افتد. اما با توجه به این‌که فرکانس تشدید ۲۹۲ Hz نزدیک به فرکانس هارمونیک ششم بوده و در محدوده‌ی فرکانس هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژ تا حدود ۲ pu بالا می‌رود، در نتیجه در صورت وجود هارمونیک‌ها امکان ایجاد ولتاژهای نامتعارف در خط وجود دارد.

در شکل (۶)، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن تک‌فاز به ازای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در فرکانس ۵۰ Hz به ترتیب برابر ۳۴/۳۳ A و ۳۳/۴۵ kV است. با توجه به پلاک مشخصات راکتور نوترال، این راکتور توانایی تحمل چنین جریان و ولتاژی را به مدت محدود دارد. از این‌رو، در صورت وصل نامتقارن خط باید هرچه سریع‌تر نسبت به رفع نامتقارنی اقدام گردد.

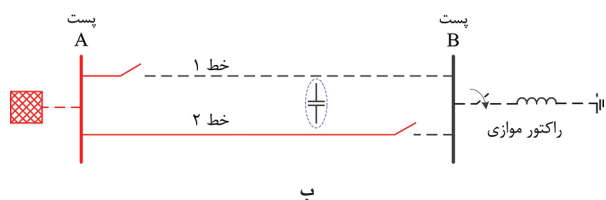


شکل ۶: جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن تک‌فاز

موقعی هم امکان ایجاد تشدید وجود دارد. دو نمونه از چنین شرایطی در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل، خط بی‌برق به همراه راکتور موازی تشکیل مدار تشدید می‌دهند و انرژی مورد نیاز توسط خط ۲ و از طریق القای ولتاژ تامین می‌شود. در نتیجه برای آن‌که تامین انرژی به درستی انجام گیرد، باید دو خط بر روی یک دکل نصب شده باشند.



الف



ب

شکل ۴: مدار تشدید در راکتور نصب شده بر روی باسیار: الف) حالت اول، ب)

حالت دوم

#### ۳- مدل‌سازی

خط ابوطالب- تربت‌جام دارای طول ۱۵۴/۵ km است. این خط دارای سه بخش متفاوت است. در بخش نخست به صورت دو مداره اجرا شده است. اما چون مدار دوم بی‌برق است، در نتیجه تشدید بررسی شده در بخش ۲-۲ نمی‌تواند در این خط ایجاد شود. در بخش دوم دکل‌ها به صورت دو مداره هستند اما فقط یک بخش سیم‌کشی شده است. در بخش سوم دکل‌ها تک مداره هستند. با توجه به اینکه پدیده‌ی تشدید در فرکانس پایین اتفاق می‌افتد، در نتیجه مدل‌سازی دقیق سیم‌های محافظ، امپدانس زمین دکل‌ها و مقره‌ها لازم نیست. علاوه بر این، خازن‌های پراکندگی تجهیزات تأثیری در نتایج نخواهد داشت. اما چون نیاز به بررسی وضعیت هارمونیک‌ها وجود دارد، خط باید به صورت وابسته به فرکانس مدل‌سازی شود.

در بست تربت‌جام یک راکتور با توان نامی ۵۰ MVar نصب شده است. در نقطه‌ی زمین این راکتور، یک راکتور نوترال با ولتاژ و توان نامی ۶/۲۵ kv و ۵/۱۰ MVar وجود دارد.

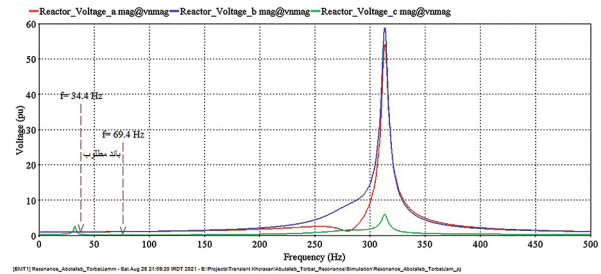
بنا به گفته‌ی CIGRE، راکتورهای با فاصله‌ی هوایی در ولتاژ pu ۱/۲۵ تا ۱/۷۵ به اشباع می‌روند. با توجه به اینکه در شرایط عادی امکان ایجاد چنین اضافه ولتاژ وجود ندارد، بنابراین تأثیر اشباع هسته در نظر گرفته نمی‌شود. زیرا در ولتاژهای کمتر از این مقادیر سیستم‌های حفاظتی عمل کرده و خط را بی‌برق می‌کنند.

#### ۴- شبیه‌سازی

در این بخش امکان وقوع تشدید در خط ابوطالب- تربت‌جام با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای آن‌که تشدید نتواند مشکلی را در خط ایجاد کند، باید دامنه‌ی ولتاژها و جریان‌ها در فرکانس ۵۰ Hz در محدوده‌ی مجاز قرار داشته باشد. علاوه بر این، در صورت وجود هارمونیک در شبکه، باید فرکانس تشدید به اندازه‌ی کافی از فرکانس هارمونیک‌ها دور باشد. در خطوط تک مداره، شرط ایجاد تشدید قطع بودن خط از سمت

#### ۲-۴- وصل نامتقارن دو فاز

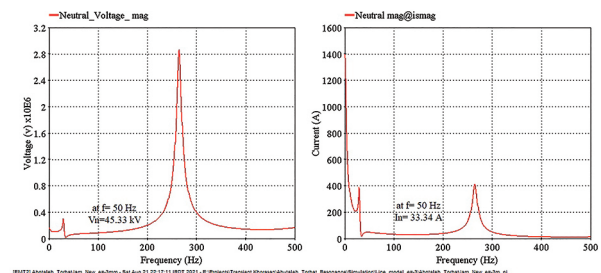
در شکل (۷)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن دو فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیکترین فرکانسهای تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانسهای ۳۱۳ و ۳۲ هرتز هستند.



شکل ۷: ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین در وصل نامتقارن دو فاز

در شکل (۷)، باند فرکانسی مطلوب که در آن ولتاژ کمتر از ۱/۰۵ است نشان داده شده است. این باند فرکانسی در محدوده ۴/۳۴ Hz تا ۴/۶۹ Hz قرار دارد. در نتیجه در فرکانس اصلی سیستم قدرت و محدوده مجاز تغییرات آن ( $\pm 3/0$  Hz) تشدید اتفاق نمی‌افتد. اما با توجه به اینکه فرکانس تشدید ۳۱۳ Hz نزدیک به فرکانس هارمونیک ششم بوده و در محدوده فرکانس هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژ تا حدود ۵ pu بالا می‌رود، در نتیجه در صورت وجود هارمونیک‌ها امکان ایجاد ولتاژهای نامتعارف در سیستم قدرت وجود دارد.

در شکل (۸)، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن دو فاز به ازای فرکانسهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در فرکانس ۵۰ Hz به ترتیب برابر ۳/۳۳ A و ۱۱/۴۴ kV است. با توجه به پلاک مشخصات راکتور نوترال، این راکتور توانایی تحمل چنین جریان و ولتاژی را به مدت محدود دارد. از این رو، در صورت وصل نامتقارن خط باید هرچه سریع‌تر نسبت به رفع نامتقارنی اقدام گردد.

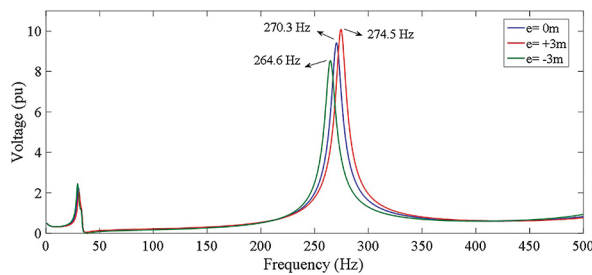


شکل ۸: جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن دو فاز

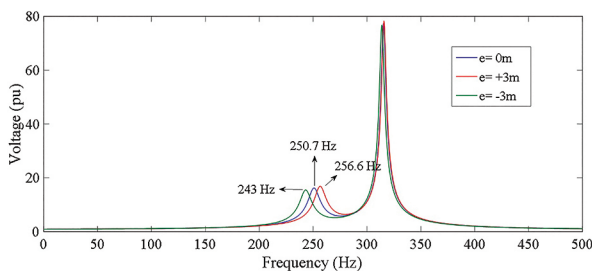
#### ۳-۴- بررسی عدم قطعیت فاصله‌ی هادی‌ها از زمین

مسیر عبور خطوط انتقال همواره با پستی و بلندی‌هایی همراه است. این پستی و بلندی‌ها بر روی خازن فاز به زمین تاثیر می‌گذارند. ارتفاع هادی استفاده شده در بخش‌های قبل ارتفاع متوسط هادی‌ها از سطح زمین در طول خط انتقال است و ممکن است همراه با خطا باشد. برای مطالعه‌ی تاثیر ارتفاع هادی‌ها بر روی فرکانس تشدید، ارتفاع هادی‌ها از زمین در سه حالت ارتفاع استفاده شده در بخش قبل ( $e=0m$ )، افزایش ارتفاع به

مقدار ۳ متر ( $e=+3m$ ) و کاهش ارتفاع به مقدار ۳ متر ( $e=-3m$ ) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان‌طور که از شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است، افزایش ارتفاع هادی‌ها باعث دور شدن فرکانس تشدید از فرکانس اصلی و کاهش ارتفاع هادی‌ها باعث نزدیک شدن فرکانس تشدید به فرکانس اصلی می‌شود. ولی چون مقدار تغییرات فرکانس تشدید در سه حالت در حد چند هرتز است، در نتیجه پستی و بلندی‌های طول خط که منجر به افزایش و کاهش ارتفاع هادی‌ها می‌شود، نمی‌تواند بر روی نتایج به دست آمده در بخش قبل تاثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد.



شکل ۹: تاثیر ارتفاع هادی‌ها بر روی فرکانس تشدید در حالت وصل نامتقارن تک فاز



شکل ۱۰: تاثیر ارتفاع هادی‌ها بر روی فرکانس تشدید در حالت وصل نامتقارن دو فاز

#### ۴-۴- بررسی تاثیر هارمونیک‌ها

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، هارمونیک‌های ولتاژ ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ با دامنه‌ی نشان داده شده در جدول (۱) در باس پست ابوطالب وجود دارند. با توجه به این که خط ابوطالب-تربت جام دارای فرکانس تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌های نشان داده شده در جدول (۱) است، از این رو امکان ایجاد اضافه ولتاژ نامتعارف در حضور هارمونیک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱: هارمونیک‌های ولتاژ در باس پست ابوطالب

دامنه (درصد از مولفه‌ی اصلی)	مرتب‌بندی هارمونیک
۰/۳۱	سوم
۰/۰۶	چهارم
۲/۶۵	پنجم
۰/۰۵	ششم
۰/۵۷	هفتم

با توجه به شکل‌های (۵) و (۷) در صورت وجود هارمونیک‌ها،

## ۶- مراجع

- [1] T. Martinich, M. Nagpal, and S. Manuel, "Analysis of Damaging Open-Phase Event on a Healthy Shunt Compensated 500 kV Line Initiated by Unintended Trip", in International Conference on Power Systems Transients, pp.2015, 1-7.
- [2] L. Wei, N. Wen-hui, and H. Dong-shan, "Analysis and Modification of a 500 kV Transmission Line Overvoltage Problem", China International Conference on Electricity Distribution, pp.2010, 1-6.
- [3] M. V. Escudero, and M. Redfern, "Effects of Transmission Line Construction on Resonance in Shunt Compensated EHV Lines", in International Conference on Power Systems Transients, pp.2005, 1-6.
- [4] M. V. Escudero, and M. Redfern, "Parametric Analysis of Parallel Resonance on Shunt Compensated Transmission Lines", in International Universities Power Engineering Conference, pp.2004, 1181-1185.
- [5] E. Nashawati, N. Fischer, B. Le, and D. Taylor, "Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection", pp.2011, 1-16.
- [6] J. Klucznik, Z. Lubosny, K. Dobrzynski, and S. Czapp, "Resonance problems in UHV transmission lines", International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp.2017, 1-6.
- [7] CIGRE, "Resonance and Ferroresonance in Power Networks", Working Group C4.307.2014.
- [8] N. G. Alvijeh, M. H. Samimi, A. A. Joneidi, and M. Rezaei, "Investigation of Resonance for Shunt Reactor in 230 Kv Minab-Jask Parallel Lines", International Power System Conference, pp.2017, 1-6.
- [9] M. H. Samimi, M. Abedini, A. H. Mostajabi, D. Farokhzad, H. Ayoubzadeh, A. A. S. Akmal, and H. Mohseni, "Reactor Failure due to Resonance in Zahedan-Irانشahr Parallel EHV Lines, Analysis and Practical Solutions", Acta Polytechnica Hungarica, vol.11, no. 1, pp.2014, 63-78.
- [10] D. A. Hammad, S. Boshoff, W. C. v. d. Merwe, C. v. Dyk, W. Otto, and U. H. E. Kleyenstüber, "SVC for Mitigating 50 Hz Resonance of a Long 400 kV ac Interconnection", pp.1999, 1-6.
- [11] V. Kuchanskyy, "Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymmetric Modes", International Conference on Energy Smart Systems (ESS), (pp.2019, 122-125).
- [12] M. V. Escudero, and M. Redfern, "Parametric analysis of parallel resonance on shunt compensated transmission lines", International Universities Power Engineering Conference, pp.2004, 1181-1185.
- [13] V. Kuchanskyy, "The prevention measure of resonance overvoltages in extra high voltage transmission lines", First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), (pp.2017, 436-441).
- [14] F. Illiceto, E. Cinieri, and A. D. Vita, "Overvoltages due to open-phase occurrence in reactor compensated EHV lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS, 103-no, 3, pp.1984, 474-483.

\*\*\*

دامنه‌ی هارمونیک‌ها مطابق جدول (۲) افزایش خواهد یافت. اما به دلیل دامنه‌ی بسیار کم مؤلفه‌های هارمونیک‌ی، این افزایش ولتاژ قابل ملاحظه نخواهد بود.

جدول ۲: مقدار افزایش دامنه‌ی هارمونیک‌ها

نوع اتصال	مرتبۀ هارمونیک	ضریب افزایش دامنه
نامتقارن تک‌فاز	سوم	۱/۴۲
	چهارم	۲/۰۴
	پنجم	۴/۰۶
	ششم	۱۰/۲۹
	هفتم	۳/۰۶
نامتقارن دو‌فاز	سوم	۱/۴۲
	چهارم	۲/۰۷
	پنجم	۴/۳۷
	ششم	۱۴/۵۰
	هفتم	۴/۹۰

به منظور بررسی دقیق‌تر، مقدار ولتاژ دو سر راکتور در شرایطی که هارمونیک‌ها وجود دارند و ولتاژ پست ابوطالب برابر  $1/05 pu$  است، به‌دست می‌آید. تحت این شرایط، مقدار حداکثر ولتاژ راکتور در وصل نامتقارن تک‌فاز و دو فاز به ترتیب برابر  $1/0692 pu$  و  $1/0655 pu$  به‌دست می‌آید. بنابراین، وجود هارمونیک‌ها باعث اضافه ولتاژی به اندازه‌ی یک درصد می‌شود. با توجه به دوره‌ی کوتاه باز و پست خودکار تک‌فاز و قدرت عایقی تجهیزات، این اضافه ولتاژ نمی‌تواند مشکلی را برای خط ایجاد نماید.

## ۵- نتیجه‌گیری

تشدید در خطوط انتقال می‌تواند تحت شرایط مختلف ایجاد شود. یکی از این شرایط، وصل نامتقارن خطوط انتقال جبران‌سازی شده با راکتور موازی است. وصل نامتقارن خطوط می‌تواند در باز و بست خودکار تک‌فاز خطوط و استفاده از سوئیچ سنکرون ایجاد شود. در این مقاله وصل نامتقارن خط ابوطالب- تربت‌جام مورد بررسی قرار گرفت. در این خط، راکتور موازی در پست تربت‌جام وجود دارد. در نتیجه وصل نامتقارن تک‌فاز از پست ابوطالب می‌تواند شرایط ایجاد تشدید را به‌وجود آورد. با شبیه‌سازی در نرم‌افزار EMTP-RV، فرکانس‌های تشدید خط ابوطالب- تربت‌جام در حالت وصل نامتقارن تک‌فاز و دو فاز از پست ابوطالب به‌دست آمد و نشان داده شد که در فرکانس سیستم قدرت ( $50 Hz$ ) امکان ایجاد تشدید وجود ندارد. اما فرکانس‌های تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌های ۵، ۶ و ۷ قرار دارند. از این‌رو، هارمونیک‌های پست ابوطالب با استفاده از نتایج اندازه‌گیری در نرم‌افزار RV-EMTP، مدل‌سازی شد و نتایج حاصل نشان داد که مقدار موثر ولتاژ راکتور در وصل نامتقارن تک‌فاز و دو فاز به ترتیب برابر  $1/0692 pu$  و  $1/0655 pu$  به‌دست می‌آید. با توجه به دوره‌ی کوتاه باز و بست خودکار تک‌فاز و قدرت عایقی تجهیزات، این اضافه ولتاژ نمی‌تواند مشکلی را برای خط ایجاد نماید.