

مقاله علمی-ترویجی

امکان‌سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰کیلوولت ابوطالب- تربت‌جام

جواد مدرسی*، مهندس برق، دانشگاه صنعتی قوچان، j.modarresi@qiet.ac.ir

عبادالله کامیاب، مدیر دفتر تحقیقات و کنترل کیفیت تجهیزات، شرکت برق منطقه‌ای- خراسان، ebad.kamyab@gmail.com

*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- تربت‌جام 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-تربت‌جام، 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*, 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

*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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

۱- مقدمه

امروزه با گسترش شبکه‌های برق و نیاز به انتقال برق از محل تولید به محل مصرف، استفاده از خطوط انتقال بلند امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از مشکلاتی که در خطوط انتقال بلند ایجاد می‌شود، افزایش ولتاژ انتهای خط به دلیل اثر فرانتی است. از این‌رو، برای کاهش اثر فرانتی و کنترل ولتاژ انتهای خطوط بلند به‌طور 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 می‌توانند باعث ایجاد تشدید در خط انتقال شوند. برای به وجود آمدن تشدید، به‌طور معمول باید یک طرف خط باز بوده و خط از طرف دیگر به‌صورت 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 به‌دلیل تشدید باعث صدمه دیدن تجهیزات شده است[۸-۶]. به‌طور مثال در زمستان ۱۳۹۳ یک مورد تشدید در برق منطقه‌ای اصفهان و در خط گلپایگان- اراک گزارش شده است که در آن به‌دلیل خطا در عملکرد قطع کلید، خط به صورت تک‌فاز از سمت اراک برق‌دار شده و ولتاژ راکتور تا ۱/۲۵ pu افزایش‌یافته است. این حادثه به‌دلیل 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 pu ۱/۱۵ 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 pu ۱/۷۱ بالا رفته و در مدت ۶/۸۵ 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 به‌دلیل 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[۱۳-۱۱]. 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 ۴۰۰ kV ابوطالب- تربت‌جام مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، وصل نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز) 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 ۴۰۰ 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 به‌صورت 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 به‌صورت نامتقارن (تک‌فاز و یا دو فاز) متصل شده باشد، ایجاد شود. اتصال نامتقارن خط می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

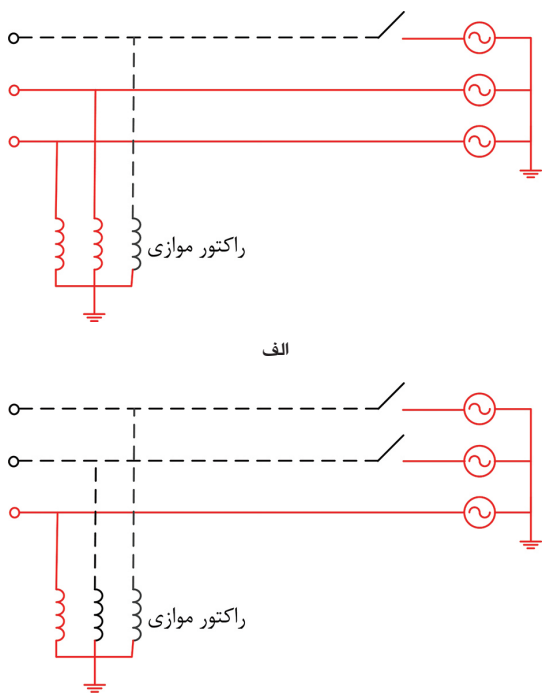
۱- فعال بودن ریکلوزرها بر روی کلیدهای ابتدا و انتهای خط؛

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

۳- استفاده از سوئیچ سنکرون در خطوط انتقال به‌منظور 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. به‌طور 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 به‌دلیل 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 به‌صورت نامتقارن متصل گردد[۷].

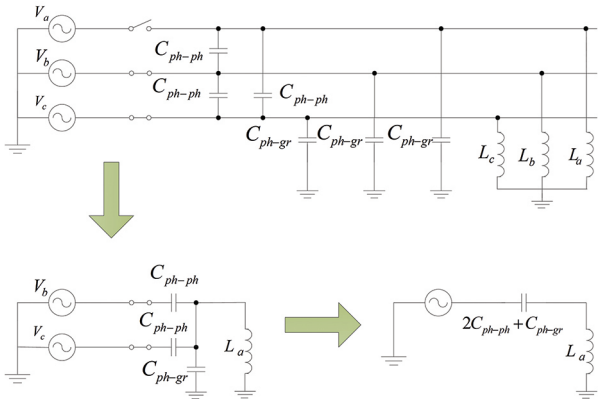


شکل ۱: ایجاد تشدید در خطوط جبران‌سازی شده با راکتور موازی: الف) وصل نامتقارن دو فاز، ب) وصل نامتقارن تک‌فاز

در شکل (۲)، مدار معادل وصل نامتقارن دو فاز نشان داده شده است. با صرف‌نظر 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،

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]



شکل۲: مدار معادل برای تحلیل تشدید در حالت وصل نامتقارن دو فاز خط

ضریب جبران‌سازی خط K به صورت (۱) تعریف می‌شود [۱۴].

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

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

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

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

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

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

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

درحالت وصل نامتقارن دوفاز خط انتقال، اگر رابطه‌ی (۵) برقرار باشد، آنگاه $f=f_0$ شده و ولتاژ به بی‌نهایت میل می‌کند.

$$k=\frac{1+2m}{1+3m} \qquad (۵)$$

در حالتی که خط به‌صورت نامتقارن تک‌فاز وصل شده باشد، فرکانس تشدید به صورت (۶) به‌دست می‌آید[۱۴].

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

در این حالت اگر رابطه‌ی زیر برقرار باشد، $f=f_0$ شده و ولتاژ به بی‌نهایت میل می‌کند.

$$k=\frac{1+m}{1+3m} \qquad (۷)$$

اضافه ولتاژ ناشی از تشدید تا وقتی‌که عدم تقارن در سیستم وجود دارد برطرف نمی‌شود و عایق خطوط، برق‌گیرها، راکتورهای موازی، ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری و کلیدهای باز شده را تحت تنش الکتریکی قرار می‌دهد. بنابراین تشخیص به‌موقع عدم تقارن و رفع آن موضوعی مهم در حفظ امنیت سیستم قدرت است.

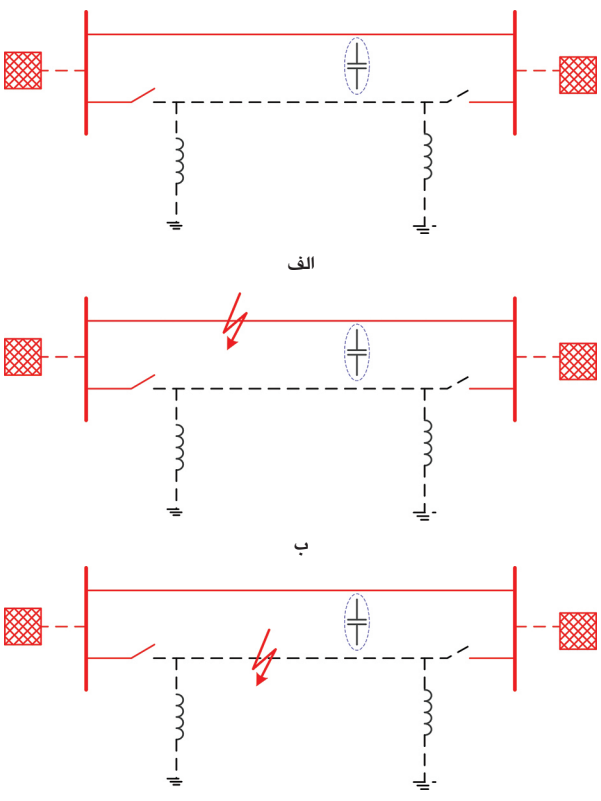
۲-۲- خطوط با راکتور موازی و کلیدزنی سه فاز

این حالت تنها در خطوط چند مداره وقتی اتفاق می‌افتد که یک مدار بی‌برق بوده و مدار دیگر برق‌دار باشد. به‌دلیل وجود القای ولتاژ خازنی بین مدارها، ولتاژی در مدار بی‌برق (مدار بی‌برق زمین نشده باشد) القا می‌شود. ولتاژ القا شده در حالت عادی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{Circuit_II}=V_{Circuit_I}\frac{C_s}{C_s+C_p} \qquad (۸)$$

در این رابطه C_s ظرفیت خازنی بین دو مدار و Cp ظرفیت خازنی بین مدار بی‌برق و زمین است. در حالت عادی، مقدار ولتاژ القا شده در مدار بی‌برق برابر کسر کوچکی از ولتاژ مدار برق‌دار است. با نصب راکتور موازی، امکان ایجاد مدار تشدید به وجود می‌آید. در فرکانس تشدید و یا نزدیک آن مقدار ولتاژ القا شده در مدار بی‌برق می‌تواند به چندین برابر مقدار به‌دست آمده از رابطه‌ی (۸) برسد[۷].

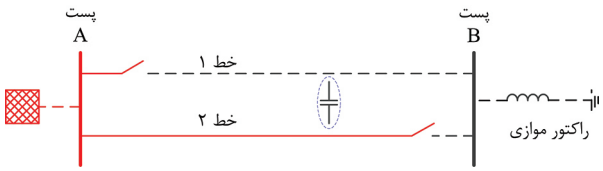
در شکل (۳)، سه مدار ایجاد تشدید در خطوط دو مداره نشان داده شده است. در حالت (الف) مدار جبران‌سازی شده بی‌برق است و با القای ولتاژ از طریق مدار برق‌دار، تشدید ایجاد می‌شود. در این حالت، مدار تشدید در حالت کار عادی شبکه ایجاد می‌شود. در حالت (ب) یک خطا در مدار برق‌دار اتفاق افتاده و باعث ایجاد مدار تشدید می‌شود. این مدار تشدید با رفع خطا از بین می‌رود. در حالت (ج) خطا در خط بی‌برق اتفاق افتاده و با رفع خطا مدار تشدید از بین می‌رود.



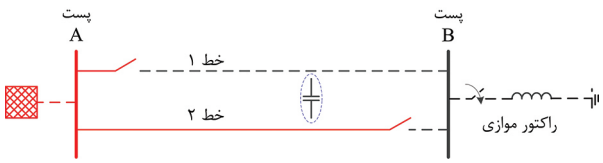
شکل ۳: مدار تشدید در خطوط چند مداره: الف) حالت دائم، ب) وقوع خطا در خط برقدار، ج) وقوع خطا در خط بی‌برق

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

مواقعی 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 برروی یک دکل نصب شده باشند.



الف



ب

شکل ۴: مدار تشدید در راکتور نصب شده بر روی باسبار: 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 به‌صورت 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 به‌صورت 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 تاثیری در نتایج نخواهد داشت. اما چون نیاز به بررسی وضعیت هارمونیک‌ها وجود دارد، خط باید به‌صورت وابسته به فرکانس مدل‌سازی شود.

در پست 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 ۵۱/۰ MVar وجود دارد.

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

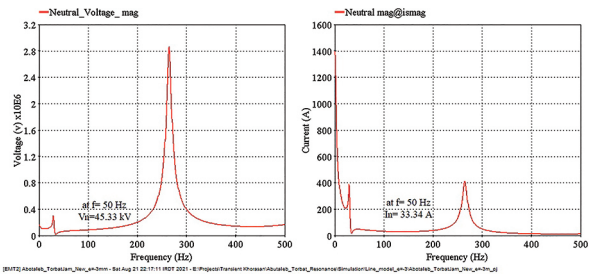
۴- شبیه‌سازی

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 براین، 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 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 پست 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

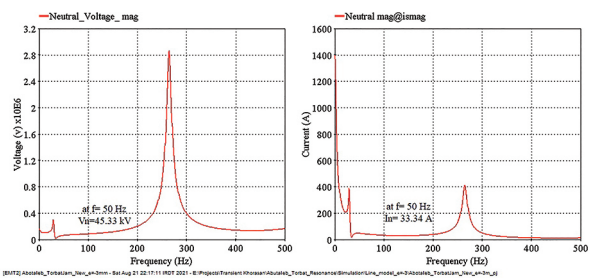
در شکل (۵)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن تک‌فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک‌ترین فرکانس‌های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس‌های ۲۹۲ و ۳۰ هرتز هستند.



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 pu ۱/۰۵ 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 (±۰/۳ 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 pu ۲ 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.

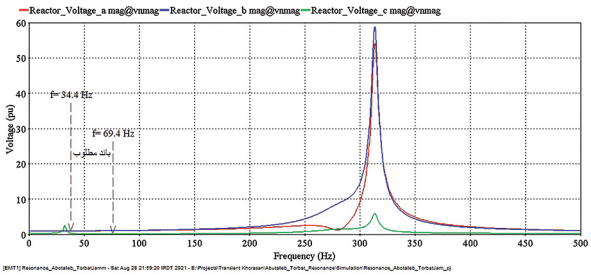


شکل ۶: جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن تک‌فاز

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

۴-۲- وصل نامتقارن دو فاز

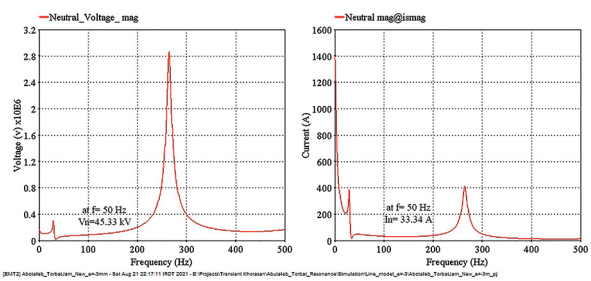
در شکل (۷)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن دو فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک‌ترین فرکانس‌های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس‌های ۳۱۳ و ۳۲ هرتز هستند.



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 pu ۱/۰۵ است نشان داده شده است. این باند فرکانسی در محدوده‌ی Hz ۴/۳۴ تا Hz ۴/۶۹ قرار دارد. در نتیجه در فرکانس اصلی سیستم قدرت و محدوده‌ی مجاز تغییرات آن (±۳/۰ Hz) تشدید اتفاق نمی‌افتد. اما با توجه به اینکه فرکانس تشدید Hz ۳۱۳ نزدیک به فرکانس هارمونیک ششم بوده و در محدوده‌ی فرکانس هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژ تا حدود pu ۵ بالا می‌رود، در نتیجه در صورت وجود هارمونیک‌ها امکان ایجاد ولتاژهای نامتعارف در سیستم قدرت وجود دارد.

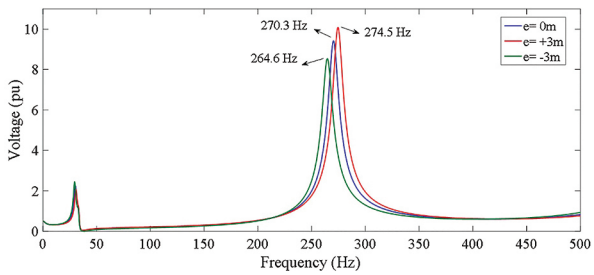
در شکل (۸)، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن دو فاز به ازای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در فرکانس Hz ۵۰ به ترتیب برابر A ۳/۳۳ و kV ۱۱/۴۴ است. با توجه به پلاک مشخصات راکتور نوترال، این راکتور توانایی تحمل چنین جریان و ولتاژی را به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



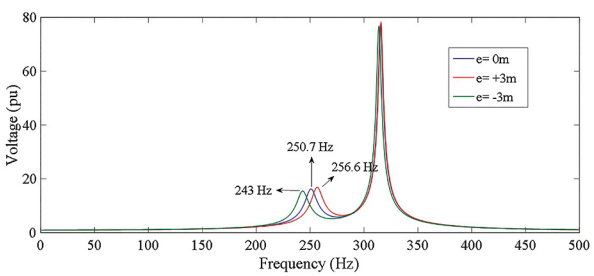
شکل ۸: جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن دوفاز

۴-۳- 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 =+۳m) و کاهش ارتفاع به مقدار ۳ متر (e =-۳m) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان‌طورکه 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 به‌دست آمده در بخش قبل تاثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارند.



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 این‌که خط ابوطالب-تربت‌جام دارای فرکانس تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌های نشان داده شده در جدول (۱) است، از این‌رو امکان ایجاد اضافه ولتاژ نامتعارف در حضور هارمونیک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱: هارمونیک‌های ولتاژ در باس پست ابوطالب

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

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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

دامنـه‌ی هارمونیک‌هـا مطابق جـدول (۲) افزایش خواهـد یافت. اما به دلیـل دامنـه‌ی بسـیار کـم مؤلفه‌هـای هارمونیکـی، این افزایـش ولتاژ قابـل ملاحظه نخواهـد بود.

جدول ۲: مقدار افزایش دامنه‌ی هارمونیک‌ها

نوع اتصال	مرتبه 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 بررسـی دقیق‌تر، مقدار ولتاژ دو سـر راکتور در شـرایطی که هارمونیک‌هـا وجـود دارند و ولتاژ پسـت ابوطالب برابر pu ۱/۰۵ اسـت، به‌دسـت می‌آیـد. تحـت این شـرایط، مقـدار حداکثـر ولتـاژ راکتور در وصـل نامتقـارن تک‌فـاز و دو فـاز بـه ترتیـب برابـر pu ۱/۰۶۹۲ و pu ۱/۰۶۵۵ به‌دسـت می‌آیـد. بنابرایـن، وجـود هارمونیک‌هـا باعث اضافه ولتـاژی بـه انـدازه‌ی یک درصد می‌شـود. بـا توجه بـه دوره‌ی کوتاه باز و بسـت خـودکار تک‌فـاز و قـدرت عایقـی تجهیـزات، این اضافـه ولتاژ نمی‌توانـد مشـکلی را بـرای خط ایجـاد نماید.

۵- نتیجه‌گیری

تشـدید در خطـوط انتقال می‌تواند تحت شـرایط مختلف ایجاد شـود. یکـی از ایـن شـرایط، وصـل نامتقـارن خطـوط انتقـال جبران‌سـازی شـده بـا راکتور موازی اسـت. وصـل نامتقـارن خطوط می‌توانـد در باز و بسـت خـودکار تک‌فاز خطوط و اسـتفاده از سـوئیچ سـنکرون ایجاد شـود. در ایـن مقالـه وصـل نامتقارن خـط ابوطالـب- تربت‌جـام مورد بررسـی قـرار گرفـت. در این خـط، راکتور مـوازی در پسـت تربت‌جام وجـود دارد. در نتیجـه وصـل نامتقـارن تک‌فـاز از پسـت ابوطالـب می‌توانـد شـرایط ایجـاد تشـدید را به‌وجـود آورد. بـا شبیه‌سـازی در نرم‌افـزار EMTP-RV، فرکانس‌هـای تشـدید خط ابوطالـب- تربت‌جام در حالـت وصـل نامتقـارن تک‌فـاز و دو فاز از پسـت ابوطالب به‌دسـت آمد و نشـان داده شـد که در فرکانس سیسـتم قدرت (۵۰ Hz) امکان ایجـاد تشـدید وجـود نـدارد. امـا فرکانس‌های تشـدید در محـدوده‌ی هارمونیک‌هـای ۵، ۶ و ۷ قـرار دارنـد. از ایـن‌رو، هارمونیک‌هـای پسـت ابوطالـب بـا اسـتفاده از نتایـج اندازه‌گیـری در نرم‌افـزار RV-EMTP، مدل‌سـازی شـد و نتایـج حاصـل نشـان داد کـه مقـدار موثر ولتـاژ راکتـور در وصـل نامتقـارن تک‌فـاز و دو فـاز به ترتیـب برابر pu ۱/۰۶۹۲ و pu ۱/۰۶۵۵ به‌دسـت می‌آیـد. با توجه بـه دوره‌ی کوتاه باز و بسـت خـودکار تک‌فـاز و قـدرت عایقـی تجهیـزات، این اضافـه ولتاژ نمی‌توانـد مشـکلی را بـرای خـط ایجـاد نماید.

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 a500 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 ,pp2017 ,1-6 .

[7] CIGRE" ,Resonance and Ferroresonance in Power Networks ",Working Group C4.307.2014 ,

[8] N .G .Alvijeh ,M .H .Samimi ,I .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 -Iranshahr 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 Assymetric 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 overvoltges in extra high voltage transmission lines ",First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering) UKRCON ,(pp.2017 ,436-441 .

[14] F .Iliceto ,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 .

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]