

## استفاده از موتور DC در تپ چنجر ترانسفورماتورهای پست‌های فوق توزیع بدون اپراتور به منظور امکان تغییر تپ از راه دور

یاسر محمودیان<sup>۱</sup>، غلامرضا اساسه<sup>۲</sup>، فهیمه طاهریان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> معاونت بهره برداری شرکت برق منطقه‌ای سمنان  
Power.electric@gmail.com

<sup>۲</sup> معاونت بهره برداری شرکت برق منطقه‌ای سمنان

<sup>۳</sup> معاونت بهره برداری شرکت برق منطقه‌ای سمنان

### چکیده

کاهش شاخص انرژی توزیع نشده به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه برق، بسیار حایز اهمیت و حیاتیست. مهندسين شبکه همواره به دنبال راهکاری جهت کاهش مدت زمان خاموشی و افزایش سرعت برقداری تجهیزات سیستم هستند. برای کاهش جریان هجومی برقداری ترانسفورماتور و به حداقل رساندن تنش‌های وارد بر سیم‌پیچی آن، برقداری ترانسفورماتورهای شبکه قدرت با تپ پایین انجام می‌گیرد. در این حالت به دلیل وجود حداکثر سیم‌پیچی و در نتیجه بیشترین مقاومت در مدار اولیه، جریان هجومی کاهش می‌یابد. همچنین جریان هجومی در مواقعی که ترانسفورماتور مجهز به رله‌های نیومریک نباشد، می‌تواند منجر به عملکرد ناصحیح حفاظتی شود. در پست‌های بدون اپراتور که در فاصله زیادی از مرکز واقع شده‌اند، برقداری ترانسفورماتور در زمان بی‌برقی کامل پست در زمان حوادث، موضوعی چالش برانگیز است. زیرا مستلزم حضور اپراتور برای کاهش دستی تپ ترانسفورماتور قبل از برقداری می‌باشد. استفاده از موتور DC برای تپ چنجر ترانسفورماتور این امکان را فراهم می‌آورد که در صورت قطع کامل برق متناوب پست، با استفاده از تغذیه DC پست، در مدت زمان کوتاهی، از مرکز کنترل نسبت به کاهش تپ ترانسفورماتور و برقداری اقدام گردد. در این مقاله با بررسی مورد مذکور پیشنهاد استفاده از موتور DC برای تپ چنجر ترانسفورماتور ارائه شده است.

### کلمات کلیدی

ترانسفورماتور، تپ چنجر، جریان هجومی، موتور جریان مستقیم.

نشده به عنوان یکی از اصلی ترین شاخص‌های قابلیت اطمینان، همواره سعی بهره برداران شبکه در کاهش مدت زمان خاموشی و برقداری سریع تجهیزات می‌باشد. تعداد زیادی از پست‌های فوق توزیع، بدون اپراتور هستند و از مرکز کنترل محلی کنترل می‌شوند. در زمان وقوع حوادثی که منجر به خاموشی کامل پست می‌شود، با توجه به قطع ولتاژ AC، می‌بایست اپراتور در پست حضور یافته و پس از کاهش دستی تپ ترانسفورماتور نسبت به برقداری ترانسفورماتور اقدام نماید. زیرا احتمال جاری شدن جریان‌های هجومی ناشی از برقداری ترانسفورماتور می‌تواند منجر به آسیب جدی به

### ۱- مقدمه

با افزایش روزافزون وابستگی به انرژی الکتریکی چه در صنایع و چه در زندگی روزمره افراد، تامین برق پایدار و بی وقفه بیش از پیش ضروری می‌نماید. حفظ امنیت و پایداری شبکه یکی از مهمترین وظایف و دغدغه همیشگی بهره برداران شبکه می‌باشد. اما وقوع حوادث شبکه برق که امری اجتناب ناپذیر است می‌تواند امنیت و پایداری شبکه را به مخاطره بیندازد و موجب کاهش قابلیت اطمینان شبکه شود. در راستای کاهش انرژی توزیع

بنابراین با در نظر گرفتن (۲) و (۳) می توان به معادله دیفرانسیل (۴) رسید.

$$V = R N \varphi / L + N d\varphi / dt \quad (۴)$$

با فرض ثابت بودن  $L$ ، پاسخ معادله دیفرانسیل (۴) به صورت رابطه (۵) خواهد بود.

$$\varphi(t) = \varphi_m \sin(\omega t + \theta_0 - \varphi) - \varphi_m \sin(\theta_0 - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)،  $\tau = L/R$  و  $\varphi = \arctan(\omega L/R)$  و  $\varphi_m$  به صورت رابطه (۶) تعریف می شود.

$$\varphi_m = \frac{V_m L}{N[R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}} \quad (۶)$$

اگر  $\omega L \gg R$  باشد، مقدار شار  $\theta_0 = \pi/2$  خواهد بود. در این صورت رابطه (۵) به صورت رابطه (۷) در می آید.

$$\varphi(t) = -\varphi_m \cos(\omega t + \theta_0) + \varphi_m \cos \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = \varphi_s + \varphi_t \quad (۷)$$

که  $\varphi_s$  شار ماندگار و  $\varphi_t$  شار گذرا است. اگر در لحظه  $t=0$  شار پس ماند  $\varphi_R$  در دست باشد، با اعمال شرایط اولیه به معادله دیفرانسیل، جمله  $\varphi_R e^{-\frac{t}{\tau}}$  نیز به رابطه (۸) افزوده می شود.

$$\varphi(t) = \varphi_R e^{-\frac{t}{\tau}} - \varphi_m \cos(\omega t + \theta_0) + \varphi_m \cos \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (۸)$$

اگر  $\theta_0 = 0$  باشد، شار مغناطیسی در اولین ماکزیمم خود همانگونه که رابطه (۸) نشان می دهد و قبلاً نیز اشاره شد، می تواند در  $\omega t = \pi$  به حدود  $2\varphi_m + \varphi_R$  برسد و این بدترین شرایط ممکن است. اگر  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$  باشد، طبق رابطه (۸) دامنه جریان هجومی به حداقل خود می رسد. در این حالت اگر شار پسماند صفر باشد، باید انتظار داشت که هیچگونه جریان هجومی ایجاد نشود. در شکل ۱ منحنی های مربوط به ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور در حالت گذرای کلیدزنی و جریان هجومی ناشی از آن دیده می شوند. همانطور که مشاهده می گردد، جریان گذرای حاصله می تواند دامنه بزرگی داشته باشد.

سیم پیچی ترانسفورماتور و یا عملکرد ناصحیح سیستم حفاظتی در شرایطی که رله ترانسفورماتور از نوع استاتیکی باشد گردد. در خصوص پست های دور از مرکز، مدت زمانی که طول می کشد تا اپراتور خود را به محل پست برساند منجر به افزایش مدت زمان خاموشی و کاهش شاخص های قابلیت اطمینان شبکه می شود. بنابراین ارائه راهکاری که بتوان از راه دور تپ ترانسفورماتور را تنظیم نمود می تواند بسیار راهگشا باشد.

## ۲- جریان هجومی

جریان هجومی در ترانسفورماتورها در اصل از اشباع زیاد هسته آهنی در مدت زمان سوئیچینگ ترانسفورماتور سرچشمه می گیرد [۱]. عامل ایجاد جریان هجومی ولتاژی است که به اولیه اعمال می شود. این ولتاژ، شار را ملزم می کند تا به ماکزیمم مقدار تئوری، یعنی دو برابر شار دائمی به علاوه شار پسماند افزایش یابد [۲]. لذا ترانسفورماتور به شدت اشباع شده و جریان زیادی را از شبکه دریافت می کند. جریان مغناطیسی ترانسفورماتورهای قدرت در حالت مانا حدود ۱ تا ۲ درصد جریان نامی ترانسفورماتور می باشد، در حالی که در هنگام برق دار کردن ترانسفورماتور مقدار این جریان ۱۰ تا ۲۰ برابر جریان نامی می رسد. تقریباً حدود ۵ تا ۱۰ سیکل و می تواند تا یک دقیقه در مورد ترانسفورماتورهای بزرگ طول بکشد تا مولفه های فرکانس بالا در این جریان کاهش یافته و جریان هجومی به حالت پایدار برسد [۳]. این جریان دارای اندازه زیاد و مولفه DC بزرگ و همچنین حاوی هارمونیک های فراوان در زمانی که هسته به اشباع می رود می باشد. اندازه جریان هجومی وابسته به نقطه ای از شکل موج AC است که در آن ترانسفورماتور برقرار می شود. اگر ترانسفورماتور لحظه ای برقرار شود که ولتاژ AC در حال عبور از صفر باشد، آنگاه مقدار جریان هجومی بسیار بالا بوده و ممکن است از نقطه زانویی در منحنی B-H عبور کند و باعث اشباع در هسته ترانسفورماتور شود [۴].

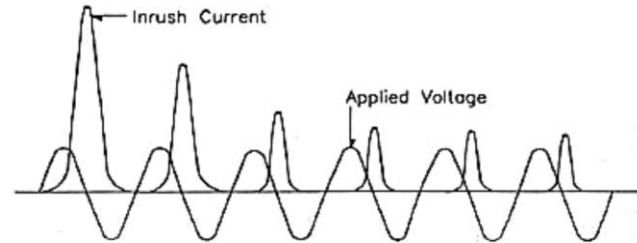
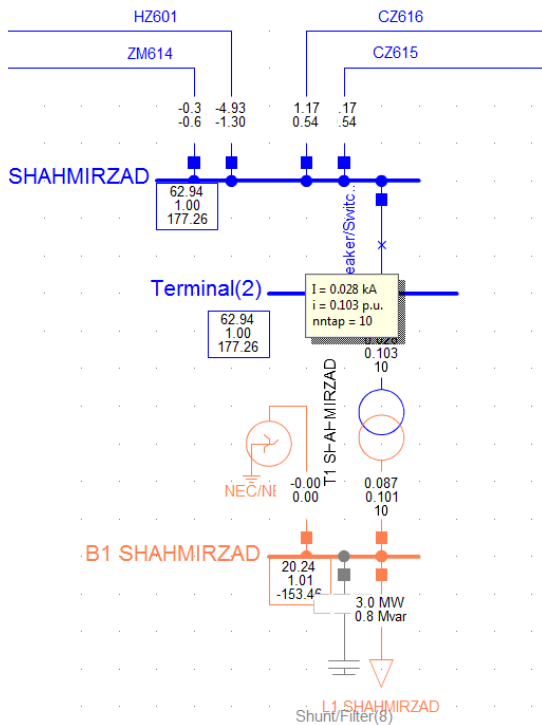
اگر موج ولتاژ سینوسی طبق رابطه (۱) باشد و در لحظه  $t=0$  با وصل کلید قدرت، به ترانسفورماتور اعمال شود، رابطه (۲) صادق خواهد بود.

$$V = V_m \sin(\omega t + \theta_0) \quad (۱)$$

$$V = Ri + N d\varphi / dt \quad (۲)$$

در این لحظه  $i$  جریان عبوری از مدار،  $\Phi$  شار تولید شده،  $N$  تعداد دور سیم پیچ برقرار شده و  $R$  مقاومت اهمی مدار سیم پیچ برقرار شده است. با فرض اندوکتانس سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور ( $L$ ) رابطه (۳) حاصل می شود.

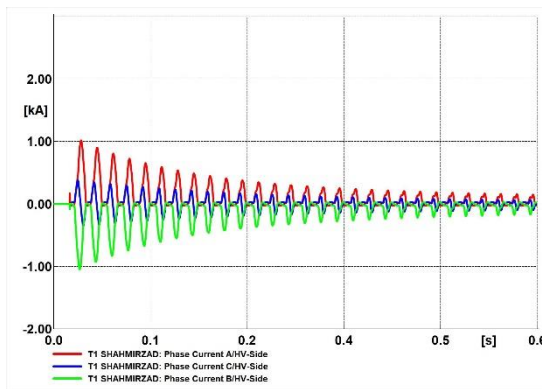
$$L = N\varphi / i \quad \text{و} \quad i = N\varphi / L \quad (۳)$$



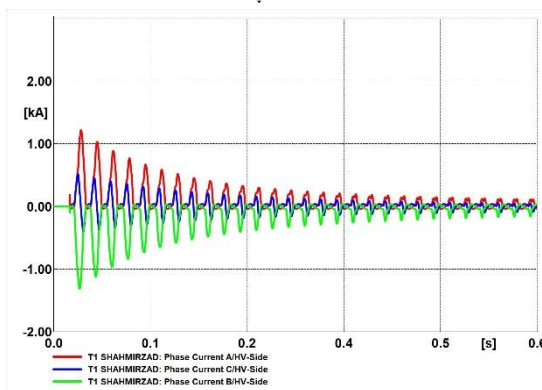
شکل (۱): ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور و جریان هجومی [۵]

جریان هجومی در حالت بارداری تقریباً با جریان هجومی در حالت بی باری برابر است. عوامل موثر در میزان جریان هجومی دامنه ولتاژ اعمالی، شارپسماند، زاویه سوئیچینگ و مقاومت سیم پیچی اولیه می‌باشد [۶]. عملکرد کاذب رله‌های حفاظتی، وارد شدن نیروهای الکترومکانیکی به سیم پیچ‌های ترانسفورماتور و در نتیجه کوتاه شدن عمر ترانسفورماتور، مشکلات کیفیت توان، ایجاد رزونانس و ... از اثرات نامطلوب جریان هجومی است. کنترل لحظه کلیدزنی، کاهش شار پسماند، اتصال مقاومت در سمت اولیه ترانسفورماتور و کلیدزنی از طرف فشارقوی از روشهای کاهش جریان هجومی است [۷]. یکی از روشهای ساده و متداول که در پست‌ها برای کاهش جریان هجومی در لحظه وصل ترانسفورماتور به کار گرفته می‌شود، کاهش تپ ترانسفورماتور است. با کاهش تپ، حداکثر میزان سیم‌پیچی در مدار اولیه قرار گرفته و افزایش مقاومت ناشی از آن منجر به کاهش جریان هجومی خواهد شد. برای درک بهتر موضوع، در یک پست ۶۳ کیلوولت استان سمنان، شبیه‌سازی جریان هجومی انجام گرفت و تاثیر تغییرات تپ ترانسفورماتور در میزان جریان هجومی لحظه برداری مشاهده گردید. شکل (۲) شبیه‌سازی پست ۶۳ کیلوولت را در نرم افزار دیگسایلنت نمایش می‌دهد. جریان هجومی فازهای ترانسفورماتور در شکل (۳) مشاهده می‌شود. ترانسفورماتور در سه تپ حداقل، نرمال و حداکثر کلیدزنی شده است. مقدار ماکزیموم جریان هجومی در حالت‌های مختلف و برای سه فاز در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، در هنگام کلیدزنی ترانسفورماتور، تغییر تپ تاثیر بسزایی در میزان جریان هجومی جاری شده خواهد داشت. محاسبه مقدار دقیق جریان هجومی ترانسفورماتور مستلزم مدلسازی دقیق مشخصات هسته و شار پسماند و همچنین به شدت وابسته به لحظه کلیدزنی ترانسفورماتور می‌باشد. با این وجود، با توجه به دامنه و مدت زمان استمرار این جریان، استفاده از تغییر تپ در هنگام کلیدزنی، روش محافظه کارانه مناسبی جهت اجتناب از تنش‌های مکانیکی و عایقی ناشی از جریان هجومی می‌باشد.

شکل (۲): شبیه‌سازی جریان هجومی در نرم افزار دیگسایلنت

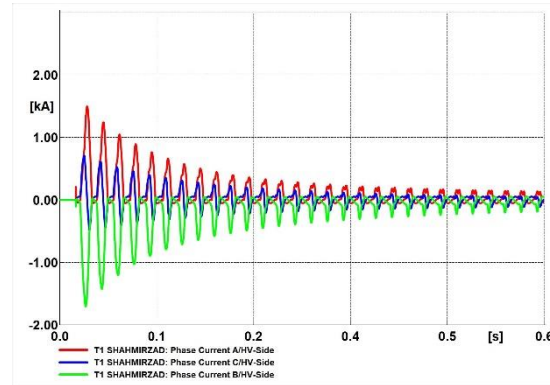


الف) تپ ۱



ب) تپ ۱۰

خصوص پست‌های بدون اپراتور که در فاصله دوری از مرکز قرار دارند، پیشنهاد می‌گردد از موتور DC جهت تغییر تپ ترانسفورماتور استفاده گردد. با توجه به وجود باتریخانه و در دسترس بودن دائمی ولتاژ DC در پست‌ها، موتور DC تپ چنجر هیچگاه بی‌برق نشده و در زمان خاموشی پست می‌تواند از راه دور فرمان گرفته و تپ را تغییر دهد. بنابراین امکان برقداری سریع پست بدون نیاز به حضور اپراتور، از مرکز کنترل محلی فراهم می‌شود. با توجه به اینکه تغییر موتور موجود تپ چنجر باعث از گارانتی خارج شدن تپ چنجرها می‌شود، بهتر است در زمان سفارش گذاری ترانسفورماتورهای پست‌های جدید الاحداث، مجموعه تپ چنجر ترانسفورماتور، به صورت DC سفارش گذاری گردد. علاوه بر مورد فوق می‌توان به عنوان راهکاری ساده تر، از اینورتر استفاده نمود. بدین صورت که با نصب اینورتر و تبدیل ولتاژ DC پست به AC، موتور تپ چنجر را تغذیه نمود. در این حالت نیز در زمان بی‌برقی کامل پست امکان تغییر تپ از راه دور وجود خواهد داشت.



ج) تپ ۱۹

شکل (۳): جریان هجومی سه فاز ترانسفورماتور

الف) تپ ۱ (ب) تپ ۱۰ (ج) تپ ۱۹

جدول (۱): جریان هجومی ترانسفورماتور در سه تپ حداقل، نرمال و حداکثر

حداکثر

Currents in A	Tap 1	Tap 10	Tap 19
HV Current-Phase A	193	316	503
HV Current-Phase B	367	675	1132
HV Current-Phase C	390	694	1175



شکل (۴): یک نمونه موتور تپ چنجر

(موتور القایی سه فاز ۷۵۰ وات)

### ۳- برقداری ترانسفورماتور

با توجه به مطالب ذکر شده در بخش ۲، مشخص گردید که پایین آوردن تپ در هنگام کلیدزنی ترانسفورماتور، راهکاری ساده و مناسب جهت کاهش جریان هجومی ناشی از کلیدزنی ترانسفورماتور است. طبق دستورالعمل بهره‌برداری از پست‌ها، پیش از برقداری ترانسفورماتور، اپراتور نسبت به کاهش تپ ترانسفورماتور اقدام و سپس بریکر سمت فشارقوی ترانسفورماتور را می‌بندد. در پست‌های بدون اپراتور، در صورتی که پس از حوادث، کل پست بی‌برق گردد، می‌بایست اپراتور به پست مراجعه نموده و نسبت به کاهش دستی تپ اقدام نماید. از آنجا که موتور تپ چنجر از نوع AC می‌باشد، با توجه به بی‌برقی کامل پست، تغذیه موتور قطع شده و امکان فرمان از راه دور وجود ندارد. یک نمونه موتور تپ چنجر در شکل (۴) مشاهده می‌گردد. در مورد پست‌هایی که از مرکز کنترل محلی فاصله دارند، مدت زمان سپری شده تا حضور اپراتور در پست، به زمان خاموشی افزوده می‌شود. در خصوص پست‌های دور دست این موضوع حائز اهمیت تر است. جهت رفع مشکل عدم امکان کنترل از راه دور موتور درایو تپ چنجر، در

### ۴- نتیجه گیری

جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق، کاهش مدت زمان خاموشی امری ضروریست. بهره‌برداران شبکه همواره در تلاشند تا در اسرع وقت نسبت به رفع خاموشی و عادی‌سازی سیستم اقدام نمایند. در پست‌های بدون اپراتور که در نقاط دورتری نسبت به مرکز کنترل قرار دارند، مدت زمان رسیدن اپراتور به پست جهت برقداری، منجر به افزایش مدت زمان خاموشی و به تبع آن افزایش شاخص انرژی توزیع نشده می‌شود. برای برقداری ترانسفورماتور، طبق دستورالعمل بهره‌برداری برای کاهش اثرات مخرب جریان هجومی و همچنین جلوگیری از اشتباه عملکرد حفاظتی در مواقعی که رله‌های ترانسفورماتور نیومریک و مجهز به فیلتر هارمونیک نباشد، اپراتور می‌بایست تپ ترانسفورماتور را پایین بیاورد. در شرایط بی‌برقی کامل پست، با توجه به از دست رفتن ولتاژ AC، امکان تغییر تپ از راه دور میسر نبوده و می‌بایست اپراتور پس از مراجعه حضوری، به صورت

دستی تپ را کاهش دهد. استفاده از موتور DC برای تپ چنجر، این امکان را فراهم می‌آورد که با فرمان از راه دور، تپ کاهش داده شده و نسبت به برقداری ترانسفورماتور اقدام گردد. علاوه بر پیشنهاد فوق، بدون تعویض موتور تپ چنجر، با نصب اینورتر و تغذیه موتور تپ چنجر از طریق اینورتر نیز می‌توان مشکل مذکور را رفع نمود. در این شرایط ترانسفورماتور در سریع‌ترین زمان ممکن برقدار شده و خاموشی مشترکین پست رفع می‌شود.

## مراجع

- [1] Y. Mahmoudian, S. Sanati, A. Allameh and A. R. Baghaei, "The Effect of Sympathetic Inrush Current on the Protection Maloperation in the Capacitor Feeder at Shahrud 63kV Substation," *2020 15th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS)*, Shiraz, Iran, 2020, pp. 80-83.
- [2] M. Jaworski and J. Jaeger, "Sympathetic Transformer Inrush Detection and Relay Blocking During Power System Restoration," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 4, pp. 2408-2417, Aug. 2023.
- [3] S. -R. Huang, H. -T. Chen, C. -C. Wu, C. -Y. Guan and C. Cheng, "Distinguishing Internal Winding Faults from Inrush Currents in Power Transformers Using Jiles-Atherton Model Parameters Based on Correlation Coefficient," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 548-553, April 2012.
- [4] A. Jalilvand and B. Faraedi, "Discrimination between internal fault and inrush currents in transformers by using chaotic method," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 14, no. 1, pp. 53-61, 2017.
- [5] M. Goggioli, *ABB Dry-Type Transformers*, Singapore: ABB Data Center Forum, 2017
- [6] T. ZHENG and P. ZHAO, "Analysis of influence factors of sympathetic inrush on differential protection and its solutions," in *Automation of Electric Power Systems*, 2009.
- [7] R. Hamilton, "Analysis of Transformer Inrush Current and Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1890-1899, July-Aug. 2013.