

## روش ترکیبی جدید جهت کاهش جریان هجومی ترانسفورماتور

بهرروز پورمند<sup>۱</sup>، محمدباقر بناه شریفیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز، behrozpormand@yahoo.com

<sup>۲</sup>دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز، sharifian@tabrizu.ac.ir

چکیده - یکی از مشکلات در ترانسفورماتورهای با هسته اشباع شونده جریان هجومی است که صدمات بسیاری را به تجهیزات وارد کرده و باعث کاهش عمر مفید آنها و همچنین صدمه به خود ترانسفورماتور می گردد. ضمناً تمهیداتی برای سیستم حفاظتی باید در نظر گرفت تا در موقع بروز جریان هجومی سیستم های حفاظتی عمل نکنند. کلیه موارد فوق باعث می گردند تا کاهش جریان هجومی در ترانسفورماتور به روش های مختلف، زمینه های مطالعاتی بیشتر محققان این مورد باشد. در روش پیشنهادی مقاله حاضر ابتدا یک فاز برقرار شده، سپس دو فاز دیگر نیز با فاصله زمانی کوتاهی برقرار می شوند. در مرحله بعد با استفاده از یک مقاومت و ادوات الکترونیک قدرت سری در نقطه نول، جریان هجومی به حداقل می رسد. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، ترانسفورماتور  $450MVA \ Y/\Delta$ ،  $72/13/8 kV$  برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته و روش پیشنهادی با روش های قبلی مقایسه می گردد. شبیه سازی مدل توسط نرم افزار *Matlab/Simulink* انجام شده و نتایج شبیه سازی برای جریان هجومی بصورت گرافیکی با روش های قبلی مقایسه شده است.

کلید واژه- استراتژی کلیدزنی، جریان هجومی، شار

الکترونیک قدرت [۱۹-۱۷] می باشد. در روش اول یک مقاومت بصورت سری در قسمت اولیه (مرکز سمت ستاره) قرار داده می شود، این مقاومت اثر میراکننده بر جریان هر فاز دارد. نتایج عملی و محاسباتی حاصل از این روش موجب کاهش ۸۰-۹۰ درصدی جریان هجومی می شود [۱]. در روش دوم کاهش جریان هجومی بوسیله محاسبه پسماند و شار فازها و بدست آوردن نقطه مناسب جهت کلید زنی ترانسفورماتور می باشد و روش سوم با استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت در مسیر سری با ترانسفورماتور، جریان هجومی کاهش می یابد [۱۹-۱۷]. در این مقاله از ترکیب هر سه روش جهت کاهش جریان هجومی استفاده می شود که در بخش نتایج موثر بودن این روش مورد تایید قرار می گیرد.

### ۲- استراتژی کلیدزنی

بهتر است قبل از همه بدلیل اهمیت کلید زنی، استراتژی های مختلف کلید زنی معرفی گردند [۸، ۹، ۱۵ و ۱۷]:

الف- استراتژی کلیدزنی سریع

ب- استراتژی کلیدزنی همزمان

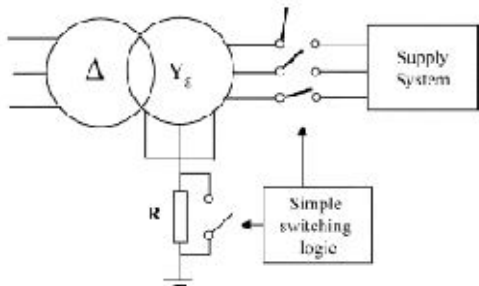
ج- استراتژی کلیدزنی با تاخیر

### ۱- مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از گرانترین و مهمترین اجزای سیستم های قدرت می باشند و با توجه به کاربرد زیاد آنها بایستی اثرات کلید زنی و جریان هجومی در آنها مورد توجه قرار گیرد. این جریان تاثیرات مخربی در ترانسفورماتورها ایجاد می کند و می تواند باعث خطا در عملکرد رله های حفاظتی و فیوزها شده و همچنین سبب تسریع در پیر شدن عایق و کاهش عمر مفید ترانسفورماتور و ایجاد تنش های شدید مکانیکی بین اجزای داخلی ترانسفورماتور خواهد شد [۳-۱]. در اثر وصل بریکر سمت اولیه ترانسفورماتورهای قدرت، به دلیل خاصیت غیرخطی هسته و وجود پسماند در آن، جریان هایی با شیب تند و دامنه بسیار زیاد از شبکه کشیده می شود. این جریان های هجومی، نامتقارن، با دامنه بالا و دارای یک طیف هارمونیک وسیع شامل هارمونیک های زوج و فرد می باشند [۴].

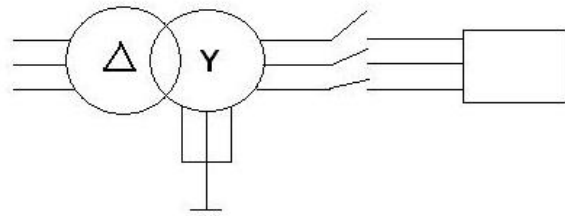
در چند دهه اخیر به منظور محدود کردن جریان هجومی چندین روش پیشنهاد شده است روش اول گذاشتن مقاومت سری در مسیر بریکر در طرف ستاره ترانسفورماتور مثلث-ستاره و یا نقطه زمین ستاره ترانسفورماتور [۵-۶] و روش دوم کنترل لحظه کلیدزنی فازها [۱۶-۷] و روش سوم استفاده از ادوات

استفاده از استراتژی کلیدزنی با تاخیر می تواند باعث کاهش جریان هجومی شود ولی استفاده از استراتژی کلیدزنی با تاخیر خود به تنهایی تاثیر چشمگیری در کاهش جریان هجومی ندارد. با توجه به شکل (۳) ترکیب این استراتژی با روش گذاستن یک مقاومت بصورت سری با نقطه زمین ستاره زمین شده ترانسفورماتور (یک مقاومت ۵۰ اهمی در نقطه نول ستاره زمین شده)، جریان هجومی از ۸۰۰ آمپر در استراتژی کلیدزنی همزمان به حدود ۵۴۰ آمپر کاهش پیدا می کند که این مدار در شکل (۳) آمده است و شکل (۴) صحت کاهش ۲۶۰ آمپری جریان هجومی را نشان می دهد.



شکل (۳): مدار مربوط به استفاده ترکیبی از استراتژی کلیدزنی همزمان و روش گذاشتن یک مقاومت ۵۰ اهمی بصورت سری با نقطه زمین ستاره زمین شده ترانسفورماتور

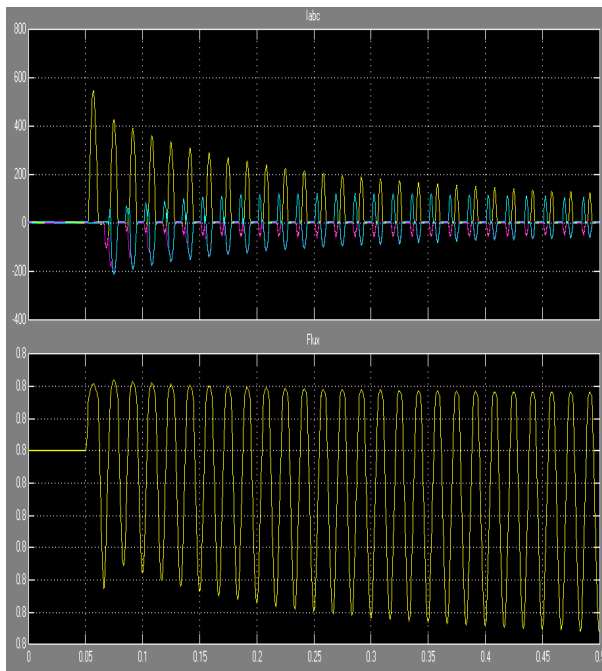
در استراتژی با کلید زنی سریع ابتدا یک فاز برقدار می شود سپس دو فاز دیگر در یک چهارم سیکل بعد بسته می شوند که این استراتژی بدلیل عدم کارایی مورد استفاده قرار نمی گیرد. در استراتژی کلیدزنی همزمان هر سه فاز بصورت همزمان کلیدزنی می شوند [۱۵]. اما بهترین استراتژی کلیدزنی، استراتژی کلیدزنی با تاخیر می باشد. در این استراتژی پس از اینکه یک فاز از ترانسفورماتور کلیدزنی می شود شار پسماند در دو فاز دیگر به سرعت بوسیله تعادل شار در هسته از بین می رود. یعنی اگر یک فاز برقدار شد پس از چند سیکل (حدود ۲-۳ سیکل) شار پسماند دو فاز دیگر قابل نظر کردن است و می توان دو فاز دیگر را وصل نمود [۱۴]. شکل (۱) مدار نمونه با نقطه نول زمین شده را نشان می دهد.



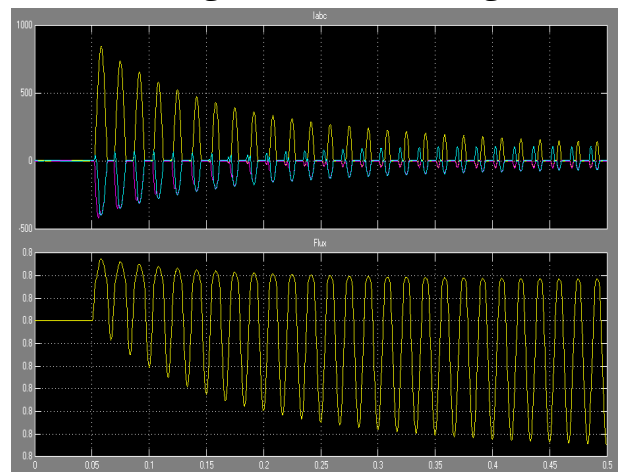
شکل (۱): مدار ترانسفورماتور نمونه با نقطه نول زمین شده

### ۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی ترکیب استراتژی کلیدزنی با تاخیر و روش اول یا همان گذاشتن یک مقاومت بصورت سری با نقطه زمین ستاره زمین شده ترانسفورماتور و استفاده از ادوات الکترونیک قدرت باعث کاهش چشمگیر جریان هجومی می شود. جهت بررسی بیشتر با توجه به استراتژی کلیدزنی همزمان جریان هجومی بصورت شکل (۲) بدست می آید.



شکل (۴): شکل موج جریان هجومی با استفاده ترکیبی از استراتژی کلیدزنی همزمان و روش گذاشتن یک مقاومت ۵۰ اهمی بصورت سری با نقطه زمین ستاره زمین شده ترانسفورماتور

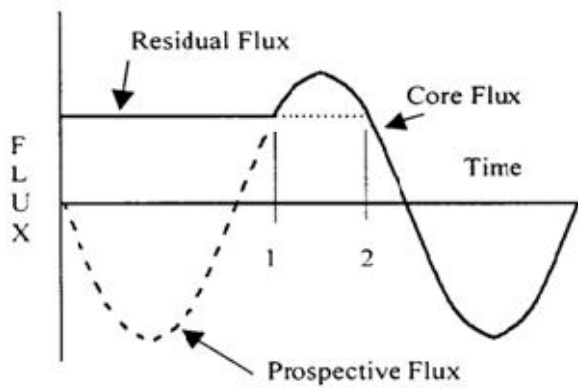


شکل (۲): جریان سه فاز و فلو در استراتژی کلیدزنی همزمان

$$\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = \frac{-1}{2} \cos(\omega t) \quad (6)$$

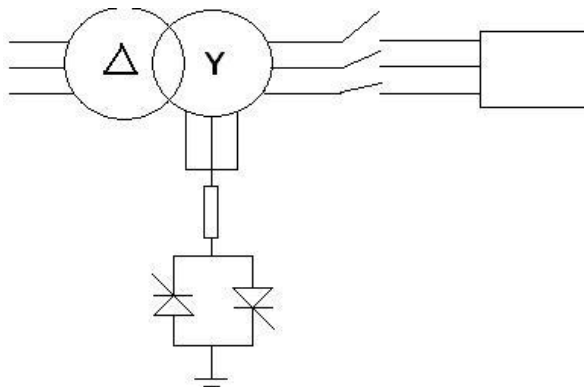
$$\omega t = \pm k\pi \quad k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

یک اصل مهم و اساسی برای حذف جریان هجومی جلوگیری از به وجود آمدن شار نامتقارن در هسته است. باید شار مورد انتظار برابر شار پسماند در زمان برقرار کردن ترانسفورماتور باشد لذا بهترین زمان کلیدزنی با توجه به شکل (۵) دو نقطه ۱ و ۲ است.



شکل (۵): بهترین نقاط برقرار کردن ترانسفورماتور

این دو نقطه در حدود ۶۰ درجه و ۱۲۰ درجه است. در مدار پیشنهادی دو تریستور موازی در نقطه نول اتصال ستاره ترانسفورماتور با یک مقاومت ۵۰ اهمی (که کار میراکنندگی جریان هجومی را انجام می دهد) بصورت سری بسته می شود و زوایای سوئیچ تریستورها ۶۰ و ۱۲۰ درجه انتخاب می گردند. شکل (۶) مدار مورد نظر را نشان می دهد.



شکل (۶): مدار پیشنهادی

در شکل (۷) جریان هجومی بدست آمده از روش پیشنهادی نشان داده شده است.

همانطوریکه در شکل (۴) دیده می شود جریان هجومی باز مقدار قابل توجهی دارد لذا با استفاده از روش پیشنهادی که یک ترکیبی با استفاده از استراتژی کلیدزنی با تاخیر و روش گذاشتن یک مقاومت بصورت سری با نقطه زمین ستاره زمین شده ترانسفورماتور و همچنین استفاده از روش قرار دادن ادوات الکترونیک قدرت مقدار قابل توجهی از جریان هجومی کاهش پیدا می کند. بدین صورت که با استفاده از استراتژی کلیدزنی با تاخیر، لحظه وصل دو فاز در زمان مشخصی (در فاصله ۲ تا ۳ سیکل) پس از برقرار شدن فاز اول صورت می گیرد که زمان دقیق آن با توجه به مرجع [۱۴] از رابطه (۱) تا (۵) بدست می آید:

(۱)

$$\varphi_a^{pros}(t) = \varphi_m \cos(\omega t)$$

$$\varphi_b^{pros}(t) = \varphi_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$\varphi_c^{pros}(t) = \varphi_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

در رابطه (۱) منظور از  $\varphi^{pros}$  شار مورد انتظار در هر یک از فازها است که از انتگرال گیری ولتاژ قبل از بریکر بدست می آید. لحظه کلیدزنی فاز اول بر مبنای شار پسماند و شار مورد انتظار در آن است. در صورتی که  $\varphi^{act}$  شار واقعی هسته در هر یک از فازها باشد شار واقعی فاز a از رابطه زیر (۲) بدست خواهد آمد:

$$\varphi_a^{act}(t) = \varphi_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

رابطه (۳) قانون بقای شار در هسته ترانسفورماتور را نشان می دهد:

$$\varphi_a^{act}(t) + \varphi_b^{act} + \varphi_c^{act} = 0 \quad (3)$$

با وصل شدن فاز اول با توجه به رابطه (۳) شارهای پسماند دو فاز دیگر از بین می رود و شارهای واقعی و پسماند پس از چند سیکل بر همدیگر منطبق می شوند و شارهای واقعی بصورت رابطه (۴) می شوند:

$$\varphi_b^{act}(t) = \varphi_c^{act}(t) = \frac{-\varphi_m}{2} \cos(\omega t) \quad (4)$$

بهترین نقطه کلیدزنی زمانی است که شار واقعی و شار مورد انتظار دو فاز b و c برابر و بصورت رابطه (۵) باشد:

$$\varphi_{b,c}^{pros}(t) = \varphi_{b,c}^{act}(t) \quad (5)$$

با توجه به روابط (۴) و (۵) بهترین زمان کلیدزنی فازهای b و c از رابطه (۶) بدست می آید:

جدول (۱): مقایسه حالت های مختلف راه اندازی ترانسفورماتور و جریان

هجومی آنها

۸۰۰ آمپر	راه اندازی ترانسفورماتور در حالت وصل کلیدها در زمان صفر
۷۵۰ آمپر	راه اندازی ترانسفورماتور در حالت کلیدزنی با تاخیر
۵۷۰ آمپر	راه اندازی ترانسفورماتور در حالت کلیدزنی با همزمان و قرار دادن مقاومت ۵۰ اهمی در نقطه نول
۵۴۰ آمپر	راه اندازی ترانسفورماتور در حالت کلیدزنی با تاخیر و قرار دادن مقاومت ۵۰ اهمی در نقطه نول
۲۴۰ آمپر	راه اندازی ترانسفورماتور به روش پیشنهادی

۴-۱- نحوه ارجاع به منابع مورد استفاده

## مراجع

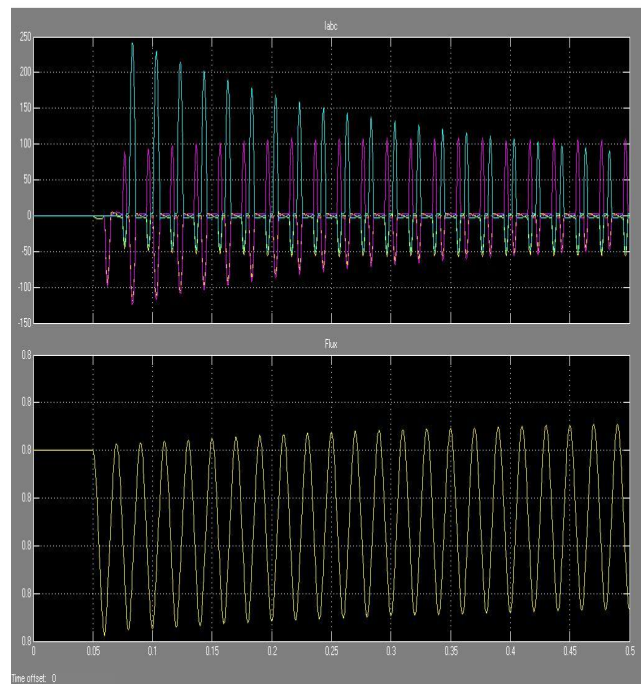
- [1] Seo, H.C.; Kim, C.H., "The analysis of power quality effects from the transformer inrush current: A case study of the Jeju power system, Korea," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, vol., no., pp.1-6, 20-24 July 2008.
- [2] Li-Cheng Wu; Chih-Wen Liu; Shih-En Chien; Ching-Shan Chen, "The Effect of Inrush Current on Transformer Protection," *Power Symposium, 2006. NAPS 2006. 38th North American*, vol., no., pp.449-456, 17-19 Sept. 2006.
- [3] Steurer, M.; Frohlich, K., "The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High-Voltage Power Transformer Coils," *Power Engineering Review, IEEE*, vol.21, no.10, pp.64, Oct. 2001.
- [4] Winders, John (2002). *Power Transformer Principles and Applications*.
- [5] Yu Cui; Abdulsalam, S.G.; Shiuming Chen Wilsun Xu, "A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction - Part I: Simulation and experimental results," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.20, no.2, pp.943-949, Apr 2005.

[۶] ع جمدارنوزوق، م عزیزیان، "کاهش جریان هجومی ترانسفورماتور سه

فاز با مقاومت خنثی بهینه با روش برقرار کردن ترتیبی فازها، بیست

و چهارمین کنفرانس برق، ۱۳۸۸.

- [7] Brunke, J.H.; Frohlich, K.J., "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. II. Application and performance considerations," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.16, no.2, pp.281-285, Apr 2001.
- [8] Brunke, J.H.; Frohlich, K.J., "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. I. Theoretical considerations," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.16, no.2, pp.276-280, Apr 2001.
- [9] Chiesa, N.; Høidalen, H.K., "Novel Approach for Reducing Transformer Inrush Currents: Laboratory Measurements, Analytical Interpretation and Simulation Studies," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.25, no.4, pp.2609-2616, Oct. 2010.
- [10] Cheng, C.K.; Liang, T.J.; Chen, J.F.; Chen, S.-D.; Yang, W.H., "Novel approach to reducing the inrush current of a power transformer," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol.151, no.3, pp. 289- 295, 8 May 2004.
- [11] Asghar, F.F.A.; Basu, K.P.; , "Reduction of three-phase transformer magnetizing inrush current by use of point on wave switching," *IEEE Student Conference on*, vol., no., pp. 368-370, 16-18 Nov. 2009.



شکل (۷): جریان هجومی بدست آمده از روش پیشنهادی

## ۴- نتیجه گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۳ اگر از سه روش استراتژی کلیدزنی با تاخیر و گذاشتن یک مقاومت بصورت سری با نقطه زمین ستاره زمین شده ترانسفورماتور و استفاده از ادوات الکترونیک قدرت بطور همزمان برای کاهش جریان هجومی استفاده شود جریان هجومی بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد بطوریکه در این مقاله جریان هجومی از حدود ۸۰۰ آمپر در حالت وصل عادی بریکرها به حدود ۲۴۰ آمپر کاهش می یابد و کاهش ۵۶۰ آمپری کارآمدی روش پیشنهادی را تایید می نماید. جدول (۱) مقایسه حالت های مختلف راه اندازی ترانسفورماتور و جریان هجومی هر کدام را نشان می دهد.

- [12] Oliveira, J.C.; Tavares, C.E.; Apolonio, R.; Vasconcellos, A.B.; Bronzeado, H.S., "Transformer Controlled Switching to Eliminate Inrush Current - PartI: Theory and Laboratory Validation," *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*, vol.,no.,pp.15-18 Aug. 2006.
- [13] Bronzeado, H.S.; Pinto, S.O.; Jonsson, P.; de Oliveira, J.C.; Chaves, M.L.R., "Transformer Controlled Switching to Eliminate Inrush Current - PartII: Field Tests on a 100MVA Three-phase Transformer," *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*, vol., no., pp. 1-7, 15-18 Aug. 2006.
- [۱۴] م عباسی، م دولتشاهی، م کیوانفرد، ع داوری، ارائه یک روش پیشنهادی کلیدزنی به منظور کاهش جریان هجومی ترانسفورماتور، بیست و ششمین کنفرانس برق، ۱۳۹۰.
- [15] Novak, M., "Elimination of three-phase transformer inrush current through core forced magnetization and simultaneous closing," *Applied Electronics (AE), 2010 International Conference on*, vol., no., pp.1-4, 8-9 Sept. 2010.
- [16] Ketabi, A.; Hadidi Zavareh, A.R., "New method for inrush current mitigation using series voltage-source PWM converter for three phase transformer," *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2011 2nd*, vol., no., pp.501-506, 16-17 Feb. 2011.
- [17] Abapour, M.; haqh, M.T., "A Non-Control Transformer Inrush Current Limiter," *Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on*, vol., no., pp.2390-2395, 15-17 Dec. 2006.
- [18] Juei-Lung Shyu, "A Novel Control Strategy to Reduce Transformer Inrush Currents by Series Compensator," *Power Electronics and Drives Systems, PEDS 2005. International Conference on*, vol.2, no., pp.1283-1288, July 2005.
- [19] Yu Cui, S. G. Abdulsalam, S. Chen, "A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction Part I: Simulation and Experimental Results," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, April 2005.