دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان‌نامه کارشناسی

گرایش:

قدرت

عنوان:

شبیه‌سازی پدیده جریان هجومی سیمپستیک در شرایط کارکرد موازی ترانسفورماتورها

استاد راهنما:

دکتر مرتضی اسلامیان

نگارش:

اسماعیل صالحی

آذر ۱۳۹۷

يَا كُمَيْلُ، أَلْعِلْمُ خَيْرٌ مِنَ الْمَالِ، أَلْعِلْمُ يَحْرُسُكَ وَ أَنْتَ تَحْرُسُ الْمَالَ، وَ الْمَالُ تَنْقُصُهُ النَّفَقَةُ وَ الْعِلْمُ يَزْكُوا عَلَى الْإِنْفَاقِ وَ صَنِيعُ الْمَالِ يَزُولُ بِزَوَالِهِ

ای کمیل، علم بهتر از مال است؛ زیرا علم، نگهبان توست؛ حال آنکه مال را تو باید نگهبان باشی. مال با بخشش کاستی پذیرد امّا علم با بخشش فزونی گیرد؛ و مقام و شخصیّتی که با مال به دست آمده با نابودی مال، نابود می‌گردد.

امیرالمؤمنین علی(علیه‌السّلام) خطاب به کمیل ابن زیاد - بخشی از حکمت ۱۴۷ نهج‌البلاغه

سپاسگزاری

شایسته است نخست از دکتر مرتضی اسلامیان تشکر کنم که با راهنمایی‌هایشان مرا در انجام پروژه حاضر یاری کردند. سپس از خانواده محترم و دوستان عزیزم که همیشه همراهم بودند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

جریان هجومی سیمپستیک زمانیکه یک ترانسفورماتور در حضور ترانسفورماتور برقدار موازی، برقدار شود اتفاق می‌افتد. هنگام کلیدزنی ترانسفورماتور دوم، به علت افت ولتاژ DC در مقاومت خط انتقال بین منبع و ترانسفورماتورها، ترانسفورماتور برقدار به اشباع منفی می‌رود و جریان هجومی سیمپستیک با مقدار پیک تا چندین برابر جریان نامی در آن جاری می‌شود که میتواند منجر به عملکرد رله‌های حفاظتی شده و ترانس در حال کار را از مدار خارج کند. در این مقاله جریان هجومی سیمپستیک برای دو ترانسفورماتور موازی و راه‌های کاهش آن مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل انتهایی شبیه سازی یک شبکه نمونه در محیط SIMULINK نرم‌افزار MATLAB برای تحقیق در مورد جریان‌های هجومی و راه‌های کاهش آن‌ها انجام گرفته است.

کلید واژه: ترانسفورماتور، جریان مغناطیس‌کنندگی، جریان هجومی، جریان هجومی سیمپستیک، شار

فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل ۱: پدیده جریان‌های هجومی ۳

۱-۱ اشباع ترانسفورماتور و جریان‌های هجومی ۳

۱-۲ محتوای هارمونیکی جریان هجومی ۷

۱-۳ اثر متقابل سیمپستیک ۹

۱-۴ اثر متقابل سیمپستیک موازی ۱۱

فصل ۲: بررسی جریان‌های هجومی ۱۴

۲-۱ تخمین مقدار اولین پیک ۱۴

۲-۲ تخمین الگوی میرایی ۱۶

۲-۳ اثرات جریان‌های هجومی ۱۹

۲-۴ عوامل مؤثر بر پدیده جریان‌های هجومی ۲۰

۲-۵ کاهش جریان‌های هجومی ۲۲

فصل ۳: شبیه سازی جریان‌های هجومی ۲۵

۳-۱ شبکه مورد مطالعه ۲۵

۳-۲ شبیه سازی جریان هجومی در حالت کارکرد تکی ترانسفورماتور ۲۸

۳-۳ شبیه سازی جریان هجومی در حالت کارکرد موازی ترانسفورماتورها ۳۱

۳-۴ راه‌های کاهش جریان‌های هجومی ۳۸

۳-۵ نتیجه‌گیری ۴۹

منابع و مأخذ ۵۰

فصل ۱: پدیده جریان‌های هجومی

در شبکه‌های برق قدرت، برقدار کردن ترانسفورماتور، حتی به صورت روزانه، یک کار عادی است که عموما بدون عواقب ناخواسته انجام می‌شود. با اینحال در همه عملیات مربوط به کلیدزنی، جریان‌ها و ولتاژهای گذرا تولید می‌شود که به طور طبیعی گذرا هستند. در اکثر موارد، این ولتاژها و جریان‌های گذرا بدون هیچ مشکلی در داخل شبکه قدرت میرا می‌شوند. با اینحال، در شرایط خاص، این جریان‌ها و ولتاژهای گذرا تولید شده هنگام برقدار کردن ترانسفورماتور می‌تواند منجر به مشکلات کیفیت توان در سیستم تغذیه و در موارد شدیدتر موجب تضعیف عایق ترانسفورماتور و یا خرابی آن ناشی از اضافه ولتاژ شود[۱].

مشکلات عمده که منجر به کاهش کیفیت توان به علت برقدار کردن ترانسفورماتور می‌گردد، را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد[۱]:

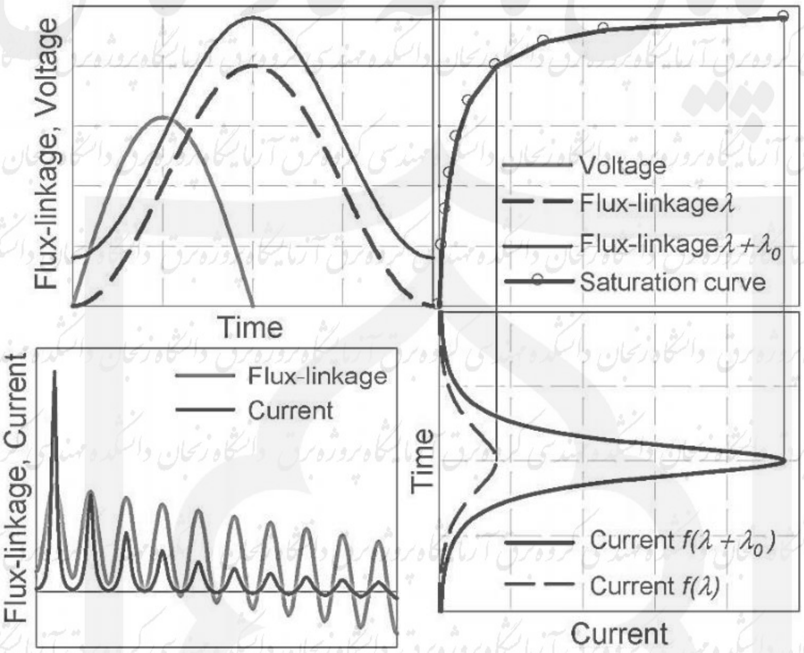
- افت ولتاژ مؤثر (V_{rms}) که سبب جریان‌های گذرا بزرگی می‌شوند.
- تولید اضافه ولتاژهای موقت زمانیکه یک تشدید موازی درون شبکه تغذیه توسط جریان‌های تغذیه برانگیخته می‌شود.
- تریپ ناخواسته رله‌های حفاظتی زمانیکه جریان‌های هجومی به صورت جریان خطا معرفی شوند.

۱-۱ اشباع ترانسفورماتور و جریان‌های هجومی

در اثر یک تغییر ناگهانی در ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور، ممکن است هسته آن به اشباع رود. اشباع هسته می‌تواند به وسیله کلیدزنی، هم‌فاز نبودن با همگامی یک ژنراتور، خطاهای خارجی و یا هنگام رفع خطا اتفاق افتد. زمانیکه هسته به اشباع می‌رود، ترانسفورماتور یک جریان مغناطیس‌کنندگی جذب می‌کند

که به عنوان جریان هجومی[۱] شناخته می‌شود که می‌تواند تا چندین برابر جریان نامی برسد. به طور معمول برقدار کردن ترانسفورماتور منجر به شدیدترین مورد جریان هجومی می شود، زیرا شار هسته در بیشترین مقدار نظری می‌تواند به ۲ تا ۳ برابر مقدار شار مجاز برسد[۲].

یک نمایش کیفی و ساده شده از پدیده جریان هجومی توسط شکل ۱-۱ هنگام برقدار شدن ترانسفورماتور در لحظه صفر ولتاژ اعمالی آمده است.



شکل ۰-۱: پدیده جریان هجومی و تأثیر شار پسماند [۱]

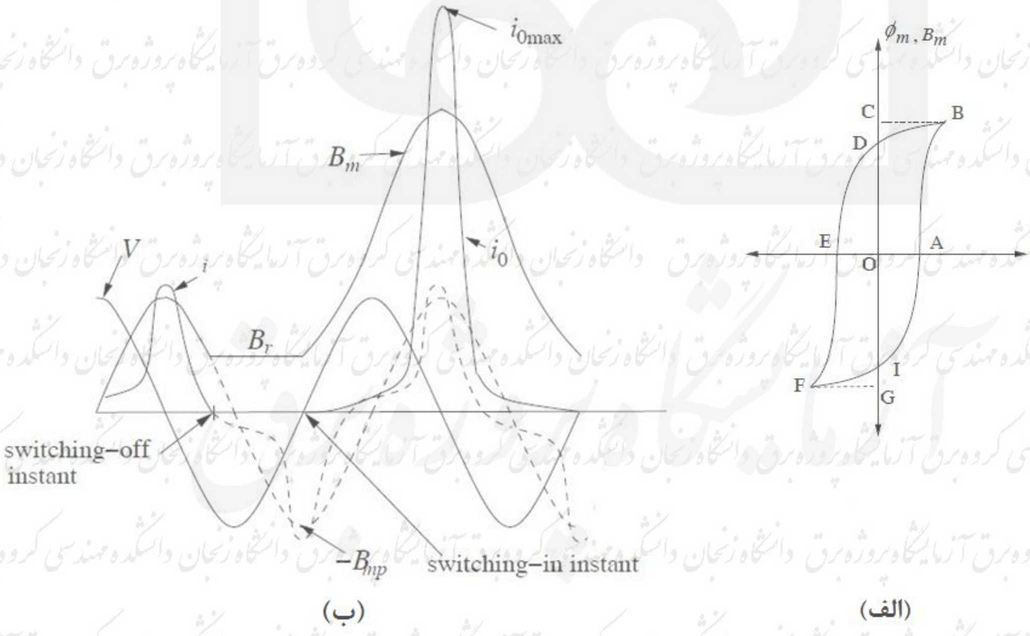
شار پیوندی از انتگرال زمانی ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور محاسبه می شود (بخش بالا-چپ شکل ۱-۱). مقدار اولیه شار پیوندی توسط شار پسماند در هسته ترانسفورماتور قبل از برقدار شدن تعیین می شود. رابطه شارپیوندی-جریان غیرخطی است و توسط منحنی اشباع ترانسفورماتور تعیین می شود (بخش بالا-راست شکل ۱-۱). بنابراین، جریان مغناطیس‌کنندگی یک ترانسفورماتور شامل هارمونیک است. زمانی که ترانسفورماتوری برقدار می شود، مقدار اولیه شار ممکن است با شار نامی (شاری که در هسته ترانسفورماتور در شرایط حالت پایدار گردش می‌کند) متفاوت باشد. این منجر به یک آفست DC از شار پیوندی و یک مقدار پیک بزرگتر از حدمجاز می‌شود. نتیجه یک جریان هجومی است که ممکن است چندین برابر جریان نامی باشد. به علت نفوذپذیری نسبی کوچک مواد فرومغناطیس در اشباع یک

---

[۱] Inrush Current

افزایش کم در پیک شار پیوندی موجب یک افزایش نمایی در جریان هجومی می شود (بخش پایین–چپ شکل ۱-۱). جریان هجومی گذرا، توسط شکل موج نامتقارن جریان در چند سیکل اولیه که عمدتا توسط مقاومت سری سیستم (مقاومت سیم‌پیچی ترانسفورماتور، خط انتقال و مقاومت سری کابل، مقاومت سیم‌پیچی ژنراتور و غیره) در حال میرا شدن است، مشخص می‌شود. یک نمایش کیفی از جریان هجومی گذرا در گوشه پایین–چپ شکل ۱-۱ نشان داده شده است[۱].

در شکل ۱-۲-ب بیشترین مقدار جریان هجومی در لحظه صفر ولتاژ اعمالی برای چگالی شار پسماند $+B_r$ که توسط کلیدزنی ایجاد شده است را نشان می‌دهد. زمانیکه یک ترانسفورماتور خاموش می شود، جریان تحریک به دنبال منحنی هیسترزیس صفر می شود، در حالیکه مقدار چگالی شار به یک مقدار غیرصفر B_r همانند شکل ۱-۲-الف (نقطه D) می‌رسد. اگر ترانس خاموش نمی‌شد، جریان تحریک (i) و چگالی شار باید مثل منحنی‌های خط‌چین می‌بود. از نظریه شار پیوندی ثابت، شار مغناطیسی در یک مدار سلفی نمی‌تواند به صورت ناگهانی تغییر کند. شار بعد از بستن کلید (در $t = 0^+$) باید برابر با شار قبل از بستن کلید (در $t = 0^-$) باقی بماند. بنابراین چگالی شار، به جای شروع از مقدار پیک منفی ($-B_{mp}$) از مقدار $+B_r$ شروع می‌شود و با رسیدن به مقدار پیک مثبت ($B_r + 2B_{mp}$)، هسته را به شرایط اشباع عمیقی می‌برد[۳].



شکل ۰-۲: الف) حلقه هیسترزیس ب)موردی از جریان هجومی ماکزیمم [۳]

برای یک ولتاژ سینو سی اعمالی به تراذ سفورماتور، چگالی شار و جریان مغناطیس‌کنندگی به طور طبیعی کراندار است، همین نتیجه با حل کردن معادله حاکم زیر نتیجه می‌شود[۳]:

$$V_p\, sin(\omega t+\theta) = i.R_۱ + N_۱ \frac{d\varphi_m}{dt} \qquad (۱-۱)$$

که V_p مقدار پیک ولتاژ اعمالی، θ زاویه در زمانی که ولتاژ اعمال می‌شـــود، i. مقدار لحظه‌ای جریان مغناطیس‌کنندگی، φ_m مقدار لحظه‌ای شـــار در هر زمان t، $R_۱$ مقاومت ســـیم‌پیچی اولیه و $N_۱$ تعداد دورهای سیم‌پیچی اولیه می‌باشد. حل معادله زمانیکه مشخصه‌های مغناطیسی خطی فرض شود و تلفات هسته نادیده گرفته شود کاملا آ سان ا ست. جواب معادله با ا ستفاده از شرط اولیه $\varphi_m = \pm\varphi_r$ در $t = ۰$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\varphi_m = \left(\varphi_{mp}\cos\theta \pm \varphi_r\right)e^{\frac{-R_۱}{L_۱}t} - \varphi_{mp}\cos(\omega t+\theta) \qquad (۲-۱)$$

برای $\theta = ۰$ و شار پسماند $+\varphi_r$، شکل موج شار (چگالی شار) در شکل ۱-۳-الف آمده ا ست. از معادله ۱-۲ می‌توان مشاهده کرد که شـکل موج شـار یک جزء گذرای DC دارد که با نرخی که تو سط نسبت مقاومت به اندوکتانس سیم‌پیچی اولیه $(\frac{R_۱}{L_۱})$ تعیین می‌شود، میرا می‌شود، و یک جزء ماندگار AC با مقدار $-\varphi_{mp}\cos(\omega t+\theta)$.

(الف)

(ب)

شکل۱-۳: الف) شکل موج شار ب) شکل موج نمونه‌ای از جریان هجومی [۳]

شکل ۱-۳-ب نمونه‌ای از جریان هجومی برای یک فاز که در نامناسب‌ترین لحظه کلید زده شده است، نشان می‌دهد (در لحظه صفر ولتاژ اعمالی). می‌توان مشاهده کرد که شکل موج جریان در چند سیکل اول به صورت متناوب در نیم سیکل‌ها، آفست کامل است، و چون در نیم سیکل‌های رفع شده چگالی شار کمتر از مقدار اشباع است، در نتیجه مقادیر جریان نیز بسیار کوچک است. از اینرو، جریان‌های هجومی بسیار نامتقارن هستند و جزء غالب هارمونیک دوم دارند و از طرح‌های حفاظتی مختلفی استفاده می‌شود تا از عملکرد ناخواسته رله‌ها جلوگیری شود[۳].

در عمل ثابت زمانی ($\frac{L}{R}$) مدار ثابت نیست. مقدار L با مقدار چگالی شار تغییر می‌کند. در طول چند سیکل اول، هسته می‌تواند در شرایط اشباع عمیقی باشد و بنابراین L کوچک است. از اینرو، نرخ اولیه کاهش جریان هجومی بالا ست. همانطور که تلفات هسته و سیم‌پیچی، مدار را میرا می‌کند و چگالی شار افت می‌کند، L افزایش می‌یابد و میرایی کندتر می‌شود. بنابراین، تنزل جریان هجومی با نرخ اولیه بالایی شروع می‌شود و به تدریج کاهش می‌یابد. کل پدیده به مدت چند ثانیه طول می‌کشد. ترانسفورماتورهای کوچکتر به دلیل داشتن ثابت زمانی کوچکتر، نرخ تنزل بالاتری دارند. به طور کلی، جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورهای با بازده کم (تلفات بالا) نرخ تنزل بالاتری دارند[۴].

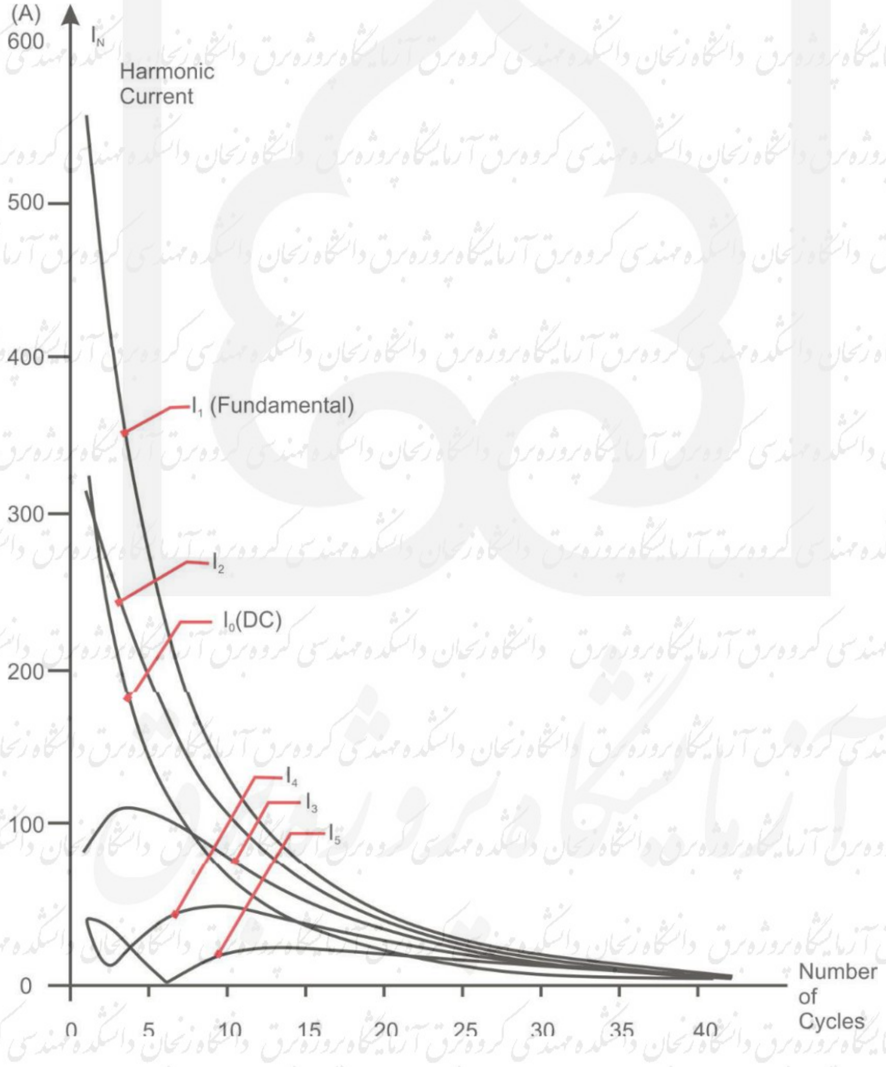
حاصل معادله ۱-۲ زمانیکه ویژگی‌های مغناطیسی خطی فرض می‌شوند به صورت یک تقریب عمده به دست می‌آید. روش‌های دقیق برای محاسبه جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورهای تکفاز در مراجع [۵و۶] آمده است که ویژگی‌های مغناطیسی غیرخطی به طور دقیق نشان داده شده است. برای ترانسفورماتورهای سه‌فاز تجزیه و تحلیل بیشتری لازم است[۷و۸و۹]. جریان‌های هجومی در حوزه هارمونیکی برای ترانسفورماتورهای سه‌فاز و تکفاز میتواند با استفاده از ماتریس‌های عملیاتی که در [۱۰] عنوان شده است، محاسبه شود.

۱-۲ محتوای هارمونیکی جریان هجومی

اشباع ترانسفورماتور یک پدیده غیرخطی شدید است و از اینرو جریان هجومی بعلاوه اجزای اصلی شامل هارمونیک و جزء DC نیز هست. تغییرات محتوای هارمونیکی جریان هجومی ترانسفورماتور با زمان در

چندین مرجع مختلف بررسی شده است[۱۱و۱۲]. برای بدست آوردن بزرگی و اختلاف فاز هر جزء هارمونیک، [۱۲] یک برنامه کاربردی از آنالیز فوریه برای هر سیکل جریان هجومی به طور جداگانه، پیشنهاد کرده است.

شکل ۱-۴ مقادیر پیک مؤلفه‌های اصلی هارمونیک یک جریان هجومی ثبت شده را، به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد[۱۳]. ملاحظه می‌شود که مقدار پیک هر جزء هارمونیک در طول یک سیکل، عموماً متفاوت از مقدار پیک آن در طول سیکل دیگر است. برای مورد نشان داده شده در شکل، هارمونیک دوم به مراتب بیشتر غالب است[۱۳]. همچنین ملاحظه می‌شود که مقادیر پیک بعضی از هارمونیک‌ها به صفر کاهش می‌یابد و سپس دوباره به مقداری بزرگتر از مقدار اولیه هنگام برقدار کردن، افزایش می‌یابد. یک شیفت فازی معکوس نیز زمانیکه مقدار هارمونیک از صفر عبور می‌کند، متداول است[۱۲].



شکل ۱-۴: اجزای هارمونیکی جریان هجومی [۱۳]

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

۳-۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر جریان هجومی سیمپستیک و عوامل مؤثر بر کاهش آن در شرایط کارکرد موازی ترانسفورماتورها مورد تحقیق قرار گرفت. با کاهش شار پسماند، کنترل لحظه کلیدزنی و اضافه کردن مقاومت سری هنگام اعمال ولتاژ، پیک جریان هجومی سیمپستیک کاهش چشمگیری یافت (به ترتیب ۶ ، ۸ و ۸ برابر). با اینحال، اگر هنگام کلیدزنی ترانسفورماتور، ترانسفورماتور موازی برقدار تحت بار باشد، پیک جریان هجومی سیمپستیک بسیار کاهش می‌یابد (حدود ۱۹ برابر) و زمان پیک آن نیز زودتر اتفاق می‌افتد. قابل ذکر است که در صورت عدم کنترل جریان هجومی سیمپستیک، این پدیده در موارد شدید میتواند موجب تریپ غیرضروری رله‌های حفاظتی شود و یا حتی ممکن است به ترانسفورماتور برقدار آسیب رساند.

منابع و مأخذ

[1] CIGRE Technical Brochures, “Transformer Energization in Power Systems: A Study Guide,” WG C4.307, 2014.

[2] L. F. Blume, A. Boyajin, G. Camilli, T. C. Lennox, S. Minneci and V. M. Monstsinger, “Transformer engineering: a treatise on the theory, operation, and application of transformers,” 2nd red., New York, N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1951.

[3] S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, “Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics,” Second Edition, Boca Raton, CRC Press, 2012.

[4] Blume, L. F., Camilli, G., Farnham, S. B., and Peterson, H. A., “Transformer magnetizing inrush currents and influence on system operation,” *AIEE Transactions*, Vol. 63, 1994, pp.366-375, 1944.

[5] Lin, C. E., Cheng, C. L., Huang, C. L., and Yeh, J. C., “Investigation of magnetizing inrush current in transformers —Part I: Numerical simulation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 246–254, January 1993.

[6] Finzi, L. A. and Mutschler, W. H., “The inrush of magnetizing current in single-phase transformers,” *AIEE Transactions*, Vol. 70, pp. 1436-1438, 1951.

[7] Yacamini, R. and Abu-Nasser, A., “The calculation of inrush currents in three-phase transformers,” *Proceedings IEE*, Vol. 133, Pt. B, No. 1, pp. 31–40, January 1986.

[8] Macfadyen, W. K., Simpson, R. R. S., Slater, R. D., and Wood, W. S., “Method of predicting transient current patterns in transformers,” *Proceedings IEE*, Vol. 120, No. 11, pp. 1393–1396, November 1973.

[9] Nakra, H. L. and Barton, T. H., “Three phase transformer transients,” *IEEE PES Winter Meeting*, New York, Paper T-74-243-2, 1974.

[10] Rico, J. J., Acha, E., and Madrigal, M., “The study of inrush current phenomenon using operational matrices,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 2, pp.231–237, April 2001.

[11] G. Sybille, M. Gavrilovic, J. Belanger and V. Q. Do, “Transformer saturation effects on EHV system overvoltage,” *IEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, nr. 3, pp. 671-680, March 1985.

[12] R. Yacamini and Abu-Nasser, “Transformer inrush currents and their associated overvoltages in HVDC schemes,” *IEE Proc.*, Vol. 133 pt. C, nr. 6, pp. 353-358, Sept 1986.

[13] H. S. Bronzeado, P. B. Brogan and R. Yacamini, “Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interactions,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, nr. 4, pp. 2051-2056, November 1996.

[14] H. S. Bronzeado, “Transformer interaction caused by inrush current,” University of Aberdeen (Scotland), MSc Thesis, 1993.

[15] H. S. Bronzeado and R. Yacamini, “Sympathetic interaction between power transformers,” Proc. of 29th Universities Power Engineering Conference-UPEC, Vol. 1, pp. 236-239, September 1994.

[16] Elmore, W. A., “Protective relaying: theory and applications,” Marcel Dekker, New York, p. 146, 1994.

[17] Rudenburg, R., “Transient performance of electric power system,” First Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 640–641, 1950.

[18] Kulkarni, S. V., “Influence of system operating conditions on magnetizing inrush phenomenon of transformer,” *International Conference on Transformers, TRAFOTECH-94*, Bangalore, India, pp. VI 19–23, January 1994.

[19] C. D. Hayward, “Prolonged inrush currents with parallel transformer affect differential relaying,” *AIEE trans.*, vol. 60, pp. 1096-1101, January 1941.

[20] H. R. Puent, M. L. Burges, E. V. Larsen and H. Elia-IL, “Energization of large shunt reactors near static Var compensators and HVDC converters,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, nr. 1, pp. 629-635, January 1989.

[21] D. Povh and W. Schultz, “Analysis of overvoltages caused by transformer magnetizing inrush current,” IEE Trans. on Power Apparatus and System, vol. %1 av %2PAS-97, nr. 4, pp. 1355-1365, Juley/Aguste 1978.

[22] Mason, C. R., “Art and science of protective relaying,” John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 259–261, 1956.

[23] Holcomb, J. E., "Distribution transformer magnetizing inrush current," *AIEE Transactions*, pp. 697–702, December 1961.

[24] Specht, T. R., "Transformer magnetizing inrush current," *AIEE Transactions*, Vol.70, pp. 323–328, 1951.

[25] Adly, A. A., "Computation of inrush current forces on transformer windings," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 2855–2857, July 2001.

[26] Mao, P. L. and Aggarwal, R. K., "A novel approach to the classification of the transient phenomenon in power transformers using combined wavelet transform and neural network," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, pp. 654–660, October 2001.

[27] Bronzeado, H. and Yacamini. R., "Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients," *Proceedings IEE Science, Measurement and Technology*, Vol. 142, No. 4.,pp. 323-329, July 1995.

[28] J. H. Brunke and K. J. Frohlich, "Elimination of transformer inrush current by controlled switching. Part I. theoretical considerations," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, nr. 2, pp. 276-280, April 2001.

[29] J. H. Brunke and K. J. Frohlich, "Elimination of transformer inrush current by controlled switching. Part II. Application and performance considerations," IEEE Trans. Power Del., vol.16, nr. 2, p.281-285, April 2001.

[30] Holmgrem, B., Jenkins, R. S., and Riubrugent, J., "Transformer inrush current," *CIGRE 1968*, Paper No. 12-03.