

تعیین مدلی جدید بر اساس الگوریتم تبدیل فوریه گسسته برای مطالعه پدیده فوق اشباع در طی برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار با امیدانس یا بار اضافه از سمت منبع و تاثیر آن بر حفاظت دیفرانسیل

بهرام نوشاد^۱، مرتضی رزاز^۲ و سید قدرت اله سیف السادات^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز- ایران

bahramnoshad@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز- ایران

razaz_m@scu.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز- ایران

seifossadat@yahoo.com

چکیده: یکی از عملکردهای ناخواسته حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور در طی برق‌دار کردن ترانسفورماتور بدون بار به همراه یک امیدانس یا بار اضافی از سمت منبع (اولیه) رخ می‌دهد که ناشی از پدیده‌ای موسوم به پدیده فوق اشباع است. این پدیده مشکلی بزرگ برای حفاظت ترانسفورماتور قدرت ایجاد می‌کند. در این مقاله برای نخستین بار مدلی جدید بر اساس الگوریتم تبدیل فوریه گسسته برای بررسی پدیده فوق اشباع در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار به همراه امیدانس یا بار اضافی از سمت منبع (اولیه) و تاثیر آن بر حفاظت دیفرانسیل ارائه می‌گردد. در این مدل علاوه بر غیرخطی بودن شاخه مغناطیس‌شوندگی، اثر ترانسفورماتور جریان در نظر گرفته شده و امیدانس یا بار اضافی در سمت اولیه به صورت مختلط $(R-L)$ است. همچنین، در این مقاله پدیده فوق اشباع در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار، با و بدون امیدانس یا بار اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور بررسی شده و تاثیر آنها بر حفاظت دیفرانسیل مقایسه می‌گردد. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع به پارامترهای متنوعی بستگی دارد که از مهمترین این پارامترها می‌توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد که در این مقاله به ازای سناریوهای مختلف برای ترانسفورماتور قدرت بدون بار، با و بدون امیدانس یا بار اضافی بررسی می‌شود. در این مقاله برای بررسی عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تبدیل فوریه گسسته، پدیده فوق اشباع، ترانسفورماتور قدرت بدون بار با و بدون امیدانس یا بار اضافی از سمت منبع، حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور.

۱- مقدمه

ترانسفورماتور قدرت استفاده شده است [۱]. به علت غیرخطی بودن هسته ترانسفورماتور، جریان مغناطیس‌کنندگی هجومی ممکن است زمانی که ترانسفورماتور برق‌دار می‌شود، رخ دهد. در این حالت، ایمنی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور تحت تاثیر قرار می‌گیرد و ممکن است این حفاظت در مواجهه با پدیده جریان هجومی دچار عملکرد ناخواسته گردد. پدیده جریان هجومی پدیده‌ای گذرا در سیستم قدرت است که در زمان

رله‌های دیفرانسیل با عنوان یکی از حفاظت‌های با عملکرد سریع برای سالیان متمادی برای حفاظت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۶/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۳۰

نام نویسنده مسؤول: بهرام نوشاد

نشانی نویسنده مسؤول: ایران - اهواز - بلوار گلستان - دانشگاه شهید

چمران اهواز- دانشکده برق

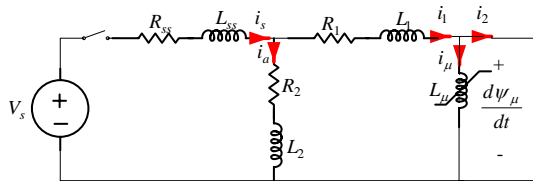
شاخه مغناطیس شوندگی به صورت غیرخطی در نظر گرفته شد و اثر ترانسفورماتور جریان مدنظر قرار گرفته و همچنین، بار به صورت مقاومتی و سلفی فرض گردید. در این حالت نیز از مدل هسته ترانسفورماتور چشم‌پوشی شده و مدل بسیار دشوار برای ترانسفورماتور جریان در سمت اولیه در نظر گرفته شده که سختی اصلی آن در مدل کردن هیستریزس است. در [۶] پدیده فوق اشباع در طی برقدار کردن ترانسفورماتورهای قدرت باردار مطالعه و نشان داده شده است که تحت شرایط خاص، جریان‌هایی که پس از سوئیچینگ ترانسفورماتور مشاهده می‌شوند، حاوی اطلاعات مهار شده کافی نیستند (برای مثال هارمونیک مرتبه دوم)، که ممکن است به عملکرد ناخواسته حفاظت ترانسفورماتور منجر شود. این مرجع به طور کامل بر روی تشریح کلی و علل احتمالی پدید آمدن حالت فوق اشباع و فوق اشباع مفرط تمرکز می‌کند. شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم افزارهای ATP-EMTP و MATLAB انجام شده است. در [۶] مکانیسم عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع بیان شده که مربوط به اشباع هسته‌های مغناطیسی ترانسفورماتورهای قدرت در طول یک جهش ناگهانی در ولتاژهای ترمینال است که پدیده‌ای شناخته شده است. این اتفاقات در طول برقدار کردن ترانسفورماتور قدرت باردار یا پس از رفع خطای اتصال کوتاه نزدیک ترانسفورماتور رخ می‌دهند. در این دو حالت ممکن است جریان‌های هجومی میرایی زیاد و نسبتاً آهسته‌ای رخ دهد که ممکن است چندین بار بیشتر از مقدار نامی آنها باشد. به عنوان یک نتیجه، یک هارمونیک مرتبه دوم ذاتی همیشه در جریان، حتی در موارد فوق‌اشباع خیلی بزرگ، وقتی که شار باقیمانده در هسته پلاریته‌ای مشابه با پلاریته شار DC ایجاد شده ناشی از جهش ناگهانی ولتاژ دارد، نیز وجود دارد که تقریباً زیر ۱۵ درصد مقدار اصلی افت نمی‌کند [۶]. بنابراین، وجود هارمونیک دوم یک معیار مهارکننده در رله‌های دیفرانسیلی است. اگر رله هارمونیک ۲ را ببیند که بیشتر از ۱۵ درصد مؤلفه اصلی است، عملکرد رله بلوک می‌شود. با این حال، شرایطی از عملکرد ناخواسته رله‌های دیفرانسیلی تحت شرایط جریان هجومی و در نتیجه این کار ترانسفورماتورهای سالم قطع شده‌اند که یکی از عواملی که

برقدار کردن ترانسفورماتور در سمت اولیه اتفاق می‌افتد [۲]. معمولاً برای تمایز بین خطای داخلی و جریان هجومی از این الگوریتم استفاده می‌شود که اگر دامنه حالت ماندگار بیشتر از ۰/۲۵ پریونیت و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه کوچکتر از ۱۵ درصد شود، رله دیفرانسیل عمل می‌کند [۳ و ۴]. بنابراین، با استفاده از این الگوریتم از عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در هنگام وقوع جریان هجومی جلوگیری می‌شود، اما در شرایط خاصی عملکرد ناخواسته رله‌های دیفرانسیل تحت شرایط جریان هجومی گزارش شده که این کار موجب قطع ترانسفورماتورهای سالم گردیده است [۵]. بنابراین، شاید گمان می‌رود که هارمونیک مرتبه دوم مهارکننده از تنظیمات رله، کوچکتر باشد. محققان مشاهده کرده‌اند که برقدار کردن یک ترانسفورماتور باردار ممکن است زمانی به پدیده فوق‌اشباع منجر شود که شار DC در هسته در مرحله اولیه از فرآیند به جای کاهش، افزایش یابد [۵]. در نتیجه، اعوجاج شکل موج‌های جریان کوچکتر می‌شود و درصد هارمونیک دوم به پایین تر از سطح مهارکننده رله افت می‌کند [۶]. در این حالت، شکل موج جریان AC، تقریباً شکل خود را حفظ می‌کند و سطح هارمونیک دوم، ناچیز است. برای مطالعه پدیده فوق اشباع و تقویت تئوری آنالیز گذرای ترانسفورماتور، یک مدل برای برقدار کردن ترانسفورماتور باردار در نظر گرفته شده است [۵]. با به کارگیری این مدل عملکرد ناخواسته تاخیری حفاظت دیفرانسیل تشریح شده است. امکان بروز پدیده فوق اشباع در طول برقدار کردن ترانسفورماتور بیان شده است، که عملکرد ناخواسته در زمان وصل ترانسفورماتور تحت بار دور از ذهن نخواهد بود. در مرجع [۵] ساده‌سازی‌های زیادی انجام شده است که می‌توان به در نظر گرفتن راکتانس مغناطیس‌کنندگی از مشخصه مختلف زمان با عنوان یک اندوکتانس معادل، چشم‌پوشی کردن از مدل هسته ترانسفورماتور، در نظر نگرفتن تاثیر ترانسفورماتور جریان برای جریان هجومی اولیه و در نظر گرفتن بار به صورت مقاومتی خالص اشاره کرد که با وضعیت واقعی منطبق نیست. در [۷] مدل قبلی پدیده فوق‌اشباع اصلاح شده و مدل جدیدی برای تجزیه و تحلیل گذرای برقدار کردن ترانسفورماتور باردار پیشنهاد شده است. در این مدل

و رله به کار برده می‌شوند. در این مقاله برای حل معادلات از الگوریتم رونگه کوتا و برای بررسی عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته استفاده می‌گردد. برای شبیه‌سازی پدیده فوق‌اشباع از نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود.

۲- مدل‌سازی برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار با امپدانس اضافی در سمت اولیه

برق‌دار کردن ترانسفورماتور بدون بار با امپدانس اضافی در اولیه ترانسفورماتور را می‌توان با مدار معادل که در شکل (۱) نشان داده شده است، شرح داد.



شکل (۱): مدل مداری برای آنالیز پدیده گذرای ترانسفورماتور برق‌دار بدون بار با امپدانس یا بار اضافی در اولیه

منبع تغذیه به صورت زیر تعریف شود:

$$V_s(t) = V \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

در این مدل V_s نیرو محرکه اجباری منبع، R_{ss} و L_{ss} مقاومت و اندوکتانس منبع، R_1 و L_1 مقاومت و اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ اولیه، R_2 و L_2 امپدانس بار اضافی در اولیه ترانسفورماتور قدرت است. شاخه مغناطیس‌کنندگی با اندوکتانس معادل L_{μ} نشان داده شده است. با توجه به مدار معادلات به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$-V_s + R_{ss}i_s + L_{ss} \frac{di_s}{dt} + R_2i_a + L_2 \frac{di_a}{dt} = 0 \quad (2)$$

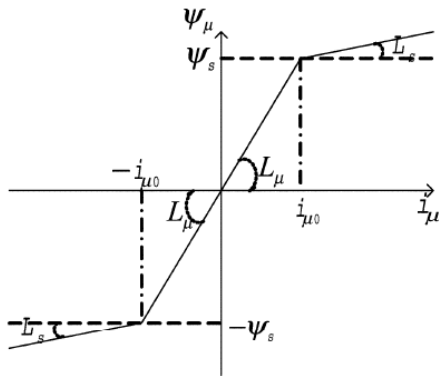
$$-R_2i_a - L_2 \frac{di_a}{dt} + R_1i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_{\mu}}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$i_s = i_a + i_1 \quad (4)$$

$$i_1 = i_{\mu} \quad (5)$$

که باعث عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل می‌شود، پدیده فوق‌اشباع است. در این حالت، جریان هجومی، مشخصاتی مانند زاویه مرده و درصد بالایی از میزان هارمونیک ۲ در طول پریود فوق‌اشباع را از دست خواهد داد و حفاظت دیفرانسیل عملکرد ناخواسته خواهد داشت [۵-۷]. در [۶] علاوه بر اینکه از مدل هسته ترانسفورماتور صرف نظر شده، در محاسبات از شاخه مغناطیس‌کنندگی نیز صرف نظر شده که منطبق بر واقعیت نیست. در تمامی مطالعات قبلی پدیده فوق‌اشباع، ترانسفورماتور قدرت باردار است [۵-۷].

در این مقاله برای نخستین بار مدلی جدیدی براساس الگوریتم تبدیل فوریه گسسته برای بررسی پدیده فوق‌اشباع در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار به همراه امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور و تاثیر آن بر حفاظت دیفرانسیل ارائه می‌گردد و برای صحت نتایج می‌توان نتایج را با نتایج مرجع [۶] با این تفاوت که در این مرجع ترانسفورماتور قدرت باردار است، مقایسه کرد. در این مدل، علاوه بر غیرخطی بودن شاخه مغناطیس‌شوندگی، اثر ترانسفورماتور جریان در نظر گرفته شده و امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه به صورت مختلط $(R-L)$ است. همچنین، در این مقاله پدیده فوق‌اشباع در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار، با و بدون امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور بررسی شده و تاثیر آنها بر حفاظت دیفرانسیل مقایسه می‌گردد. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق‌اشباع به پارامترهای متنوعی بستگی دارد که از مهمترین این پارامترها می‌توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد که در این مقاله به ازای سناریوهای مختلف برای ترانسفورماتور قدرت بدون بار با و بدون امپدانس یا بار اضافی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل علاوه بر شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت به امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه نیز بستگی دارد. تشریح پدیده فوق‌اشباع، نخستین گام به سوی بهبود ایده‌ها و معیارهای جدید برای حفاظت با قابلیت اعتماد بیشتر ترانسفورماتور قدرت برای کنترل حالت‌هایی غیرمعمول است که هم‌اکنون در تجهیزات



شکل (۲): مشخصه تقریبی مغناطیس کننده هسته ترانسفورماتور

رابطه (۸) را در روابط (۳) و (۶) قرار می‌دهیم:

$$\begin{aligned}
 & i_a (R_{ss} + R_2) + R_{ss} \frac{\Psi_\mu}{L_s} \\
 & - R_{ss} \frac{\Psi_s}{L_s} + R_{ss} i_{\mu 0} \\
 & + (L_2 + L_{ss}) \frac{di_a}{dt} \\
 & + \frac{L_{ss}}{L_s} \frac{d\Psi_\mu}{dt} = V_s \\
 & - R_2 i_a - L_2 \frac{di_a}{dt} + R_1 \frac{\Psi_\mu}{L_s} - R_1 \frac{\Psi_s}{L_s} + \\
 & R_1 i_{\mu 0} + \frac{L_1}{L_s} \frac{d\Psi_\mu}{dt} + \frac{d\Psi_\mu}{dt} = 0 \quad (10)
 \end{aligned}$$

با توجه به معادلات (۹) و (۱۰) داریم:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_\mu}{dt} &= \frac{1}{\frac{L_2 L_{ss}}{L_s} + (1 + \frac{L_1}{L_s})(L_2 + L_{ss})} \\
 [L_2 V_s - (L_2 R_{ss} - L_{ss} R_2) i_a - (L_2 R_{ss} + \\
 R_1 L_2 + R_1 L_{ss}) \frac{\Psi_\mu}{L_s} + (R_{ss} L_2 + R_1 L_2 + \\
 R_1 L_{ss}) \frac{\Psi_s}{L_s} - (R_{ss} L_2 + R_1 L_2 + R_1 L_{ss}) i_{\mu 0}] \quad (11)
 \end{aligned}$$

با جایگزینی روابط (۴) و (۵) در رابطه (۲)، رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 & i_a (R_{ss} + R_2) + R_{ss} i_\mu + (L_2 + L_{ss}) \frac{di_a}{dt} \\
 & + L_{ss} \frac{di_\mu}{dt} = V_s \quad (6)
 \end{aligned}$$

با توجه به شکل (۲) جریان شاخه مغناطیس‌کنندگی غیرخطی i_μ و تابعی از Ψ_μ است. اگر بنا باشد اثر هیستریزس در نظر گرفته شود، منحنی دقیق $\Psi_\mu - i_\mu$ باید به صورت یک منحنی چند مقداره نشان داده شود. برای راحتی حل معادلات دیفرانسیل، منحنی مغناطیس‌کنندگی به صورت منحنی نشان داده شده در شکل ۲ تقریب زده می‌شود. می‌توان فرض کرد که نقطه اشباع است. اندوکتانس منطقه اشباع L_s و اندوکتانس منطقه غیراشباع L_μ است. باید توجه داشت که اندوکتانس شاخه مغناطیس‌شوندگی ترانسفورماتور هنوز غیرخطی است؛ حتی اگر ساده سازی‌های بالا به کار گرفته شود. به عنوان یک نتیجه، برای i_μ معادله زیر را خواهیم داشت:

$$i_\mu = \begin{cases} \frac{\Psi_\mu - \Psi_s}{L_s} + i_{\mu 0} & \Psi_\mu > \Psi_s \\ \frac{\Psi_\mu + \Psi_s}{L_s} - i_{\mu 0} & \Psi_\mu < -\Psi_s \\ i_{\mu 0} \frac{\Psi_\mu}{\Psi_s} & |\Psi_\mu| \leq \Psi_s \end{cases} \quad (7)$$

که Ψ_μ شار پیوندی، Ψ_s شار پیوندی در نقطه زانو از منحنی مغناطیس‌کنندگی، $i_{\mu 0}$ جریان مغناطیس‌کنندگی در نقطه زانوی از منحنی مغناطیس‌کنندگی و L_s شیب اشباع منحنی مغناطیس‌کنندگی است.

منحنی مغناطیسی‌شوندگی نشان داده شده در شکل (۲) به سه ناحیه تقسیم می‌شود:

حالت اول، برای $\Psi_\mu > \Psi_s$:

طبق روابط (۵) و (۷) داریم:

$$i_\mu = \frac{(\Psi_\mu - \Psi_s)}{L_s} + i_{\mu 0} \quad (8)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{(L_2 + L_{ss})} \begin{bmatrix} V_s - i_a(R_{ss} + R_2) - R_{ss} \frac{\psi_\mu}{L_s} \\ -R_{ss} \frac{\psi_s}{L_s} + R_{ss} i_{\mu_0} - \frac{L_{ss}}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \end{bmatrix} \quad (17)$$

حالت سوم، برای ψ_μ :

در این حالت جریان مغناطیس‌کنندگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$i_\mu = i_{\mu_0} \frac{\psi_\mu}{\psi_s} \quad (18)$$

رابطه (۱۸) را در روابط (۳) و (۶) قرار می‌دهیم:

$$i_a(R_{ss} + R_2) + R_{ss} \frac{\psi_\mu}{\psi_s} i_{\mu_0} + \quad (19)$$

$$(L_2 + L_{ss}) \frac{di_a}{dt} + L_{ss} \frac{i_{\mu_0}}{\psi_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} = V_s$$

$$-R_2 i_a - L_2 \frac{di_a}{dt} + R_1 \frac{\psi_\mu}{\psi_s} i_{\mu_0} + L_1 \frac{i_{\mu_0}}{\psi_s} \quad (20)$$

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} + \frac{d\psi_\mu}{dt} = 0$$

با توجه به معادلات (۱۹) و (۲۰) داریم:

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{1}{L_2 L_{ss} \frac{i_{\mu_0}}{\psi_s} + (1 + \frac{L_1 i_{\mu_0}}{\psi_s})(L_2 + L_{ss})} \quad (21)$$

$$[L_2 V_s - (L_2 R_{ss} - L_{ss} R_2) i_a - (L_2 R_{ss} + R_1 L_2 + R_1 L_{ss}) \frac{\psi_\mu}{\psi_s} i_{\mu_0}] \quad (22)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{(L_2 + L_{ss})} \begin{bmatrix} V_s - i_a(R_{ss} + R_2) - R_{ss} \frac{\psi_\mu}{\psi_s} i_{\mu_0} \\ -\frac{L_{ss} i_{\mu_0}}{\psi_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \end{bmatrix} \quad (22)$$

۳- مدل‌سازی ترانسفورماتور جریان

مدار معادل یک ترانسفورماتور جریان در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مدار R_1 و L_1 شامل مقاومت و اندوکتانس اولیه و شبکه هستند. R_2 و L_2 مقاومت و اندوکتانس ثانویه ترانسفورماتور جریان، R_b و L_b مقاومت و اندوکتانس بار هستند. از آنجایی که مولفه تلفات هسته روی اشباع ترانسفورماتور جریان تاثیری ندارد، از آن صرف نظر

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{(L_2 + L_{ss})} \begin{bmatrix} V_s - i_a(R_{ss} + R_2) - R_{ss} \frac{\psi_\mu}{L_s} \\ R_{ss} \frac{\psi_\mu}{L_s} + R_{ss} \frac{\psi_s}{L_s} \\ R_{ss} i_{\mu_0} - \frac{L_{ss}}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \end{bmatrix} \quad (12)$$

حالت دوم، برای $\psi_\mu < -\psi_s$:

در این حالت جریان مغناطیس‌کنندگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$i_\mu = \frac{(\psi_\mu + \psi_s)}{L_s} - i_{\mu_0} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) را در روابط (۳) و (۶) قرار می‌دهیم:

$$i_a(R_{ss} + R_2) + R_{ss} \frac{\psi_\mu}{L_s} + R_{ss} \frac{\psi_s}{L_s} - R_{ss} i_{\mu_0} \quad (14)$$

$$+ (L_2 + L_{ss}) \frac{di_a}{dt}$$

$$+ \frac{L_{ss}}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} = V_s$$

$$- R_2 i_a - L_2 \frac{di_a}{dt}$$

$$+ R_1 \frac{\psi_\mu}{L_s} + R_1 \frac{\psi_s}{L_s} \quad (15)$$

$$- R_1 i_{\mu_0} + \frac{L_1}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt}$$

$$+ \frac{d\psi_\mu}{dt} = 0$$

با توجه به معادلات (۱۴) و (۱۵) داریم:

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{1}{\frac{L_2 L_{ss}}{L_s} + (1 + \frac{L_1}{L_s})(L_2 + L_{ss})} \quad (16)$$

$$[L_2 V_s - (L_2 R_{ss} - L_{ss} R_2) i_a - (L_2 R_{ss} + R_1 L_2 + R_1 L_{ss}) \frac{\psi_\mu}{L_s} - (R_{ss} L_2 + R_1 L_2 + R_1 L_{ss}) i_{\mu_0}] \quad (16)$$

$$+ R_1 L_{ss} \frac{\psi_s}{L_s} + (R_{ss} L_2 + R_1 L_2 + R_1 L_{ss}) i_{\mu_0}]$$

حالت اول، برای $\psi_\mu > \psi_s$:

$$i_\mu = \frac{(\psi_\mu - \psi_s)}{L_s} + i_{\mu 0} \quad (28)$$

با توجه به روابط (۲۷) و (۲۸) داریم:

$$i_s = i_{ps} - \frac{1}{L_s}(\psi_\mu - \psi_s) - i_{\mu 0} \quad (29)$$

از طرفین رابطه (۲۹) دیفرانسیل می‌گیریم:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_{ps}}{dt} - \frac{1}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \quad (30)$$

از آنجایی که $\frac{d\psi_\mu}{dt} = e_s$ و طبق روابط (۲۵) و (۲۹) داریم:

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{RL_s}{L_s + L} (i_{ps} - \frac{(\psi_\mu - \psi_s)}{L_s} - i_{\mu 0}) + \frac{LL_s}{L_s + L} (\frac{di_{ps}}{dt}) \quad (31)$$

حالت دوم، برای $\psi_\mu < -\psi_s$:

$$i_\mu = \frac{1}{L_s}(\psi_\mu + \psi_s) - i_{\mu 0} \quad (32)$$

با توجه به روابط (۲۷) و (۳۲) داریم:

$$i_s = i_{ps} - \frac{1}{L_s}(\psi_\mu + \psi_s) + i_{\mu 0} \quad (33)$$

از طرفین رابطه (۳۳) دیفرانسیل می‌گیریم:

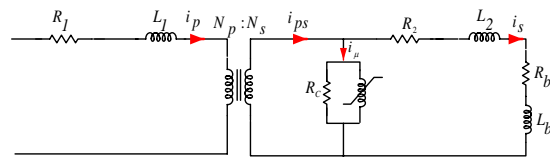
$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_{ps}}{dt} - \frac{1}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \quad (34)$$

از آنجایی که $\frac{d\psi_\mu}{dt} = e_s$ و طبق روابط (۲۵) و (۳۳) داریم:

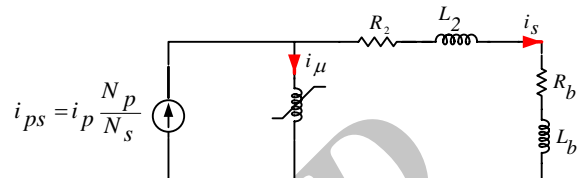
$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{RL_s}{L_s + L} (i_{ps} - \frac{(\psi_\mu + \psi_s)}{L_s} + i_{\mu 0}) + \frac{LL_s}{L_s + L} (\frac{di_{ps}}{dt}) \quad (35)$$

حالت سوم، برای $|\psi_\mu| \leq \psi_s$:

شده است [۸]. مدار معادل ترانسفورماتور جریان ارجاع داده شده به سمت ثانویه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۳): مدار معادل ترانسفورماتور جریان



شکل ۴: مدار معادل ترانسفورماتور جریان ارجاع داده شده به

سمت ثانویه

برای مدل کردن مشخصات مغناطیسی ترانسفورماتور جریان از منحنی تقریبی نشان داده شده در شکل (۲) استفاده می‌شود که در آن مقادیر ψ_s و $i_{\mu 0}$ برای ترانسفورماتور قدرت و ترانسفورماتور جریان متفاوت هستند. برای مدل کردن ترانسفورماتور جریان، مدار معادل که در شکل ۴ نشان داده شده، در نظر گرفته می‌شود. در این مدار معادل ابتدا پارامترهای زیر را تعریف می‌کنیم:

$$R = R_2 + R_b \quad (23)$$

$$L = L_2 + L_b$$

طبق مدار معادل نشان داده شده در شکل (۴) داریم:

$$i_{ps} = i_\mu + i_s \quad (24)$$

$$e_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (25)$$

$$i_{ps} = \frac{N_p}{N_s} i_p \quad (26)$$

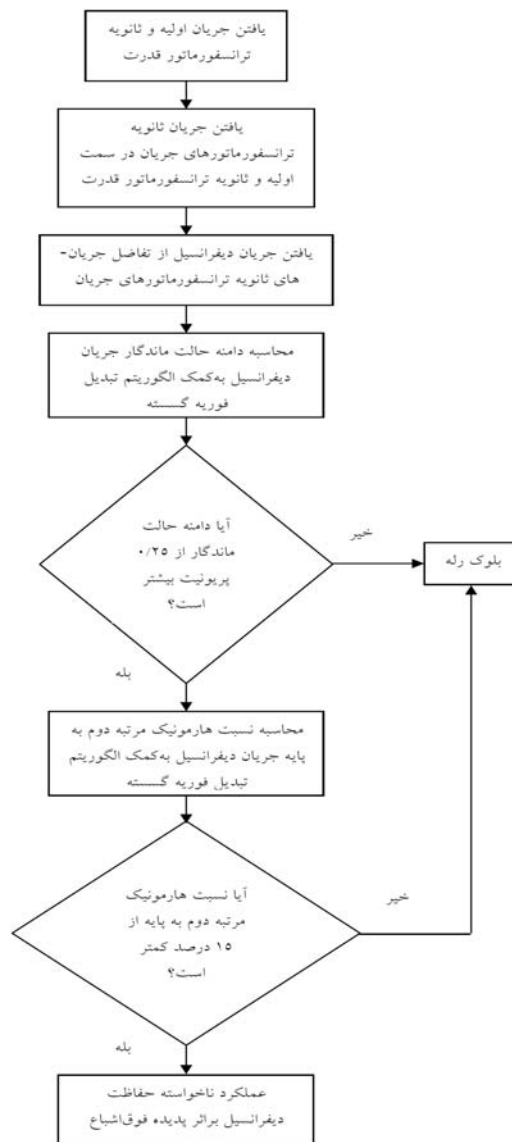
که i_{ps} جریان اولیه ارجاع شده به سمت ثانویه، i_μ جریان مغناطیس‌کنندگی، i_s جریان ثانویه، N_p تعداد دورهای اولیه، N_s تعداد دورهای ثانویه و e_s ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ ثانویه است. طبق رابطه (۲۴) داریم:

$$i_s = i_{ps} - i_\mu \quad (27)$$

با در نظر گرفتن اشباع، منحنی مغناطیسی شوندهگی نشان داده شده در شکل (۲) به سه ناحیه تقسیم می‌شوند:

به کمک تبدیل فوریه گسسته محاسبه می‌شود. در صورتی که این نسبت از ۱۵ درصد بزرگتر باشد، عملکرد رله دوباره بلوک خواهد شد، اما در صورتی که نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه از ۱۵ درصد کوچکتر شود، عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل رخ می‌دهد. بنابراین، در صورتی که به طور همزمان دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل از ۰/۲۵ پرینیت بیشتر و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه از ۱۵ درصد کوچکتر باشد حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق‌اشباع عملکرد ناخواسته خواهد داشت. به‌طور کلی فلوچارت عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده

فوق‌اشباع در شکل (۵) آورده شده است.



شکل (۵): فلوچارت عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر

اثر پدیده فوق‌اشباع

$$i_{\mu} = i_{\mu 0} \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s} \quad (36)$$

با توجه به روابط (۲۷) و (۳۶) داریم:

$$i_s = i_{ps} - i_{\mu 0} \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s} \quad (37)$$

از طرفین رابطه (۳۷) دیفرانسیل می‌گیریم:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_{ps}}{dt} - \frac{i_{\mu 0}}{\psi_s} \frac{d\psi_{\mu}}{dt} \quad (38)$$

از آنجایی که $\frac{d\psi_{\mu}}{dt} = e_s$ و طبق روابط (۲۵) و

(۳۷) و (۳۸) داریم:

$$\frac{d\psi_{\mu}}{dt} = \frac{R\psi_s}{\psi_s + Li_{\mu 0}} (i_{ps} - i_{\mu 0} \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s}) + \frac{L\psi_s}{\psi_s + Li_{\mu 0}} (\frac{di_{ps}}{dt}) \quad (39)$$

۴- الگوریتم عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت بر اثر پدیده فوق‌اشباع

در این مقاله، برای بررسی عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت بر اثر پدیده فوق‌اشباع از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته استفاده می‌شود. در این الگوریتم، ابتدا جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت به دست آورده شده و سپس جریان ثانویه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت محاسبه می‌شود. جریانی دیفرانسیل از تقاضای جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور قدرت به دست آورده می‌شود. در مرحله بعد، دامنه حالت ماندگار مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به کمک تبدیل فوریه گسسته محاسبه شده و در صورتی که دامنه مؤلفه حالت ماندگار از ۰/۲۵ پرینیت کمتر باشد، عملکرد رله بلوک خواهد شد، اما در صورتی که دامنه حالت ماندگار از ۰/۲۵ پرینیت بیشتر باشد، نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل

$$k = 600/5, B_s = 1.8T, L_s = 0.7mH,$$

$$A = 3.472e^{-3}m^2, \psi_s = 0.75wb * turns,$$

$$i_{\mu 0} = 0.05mA, R = 0.05\Omega$$

برای ترانسفورماتور جریان در سمت ثانویه ترانسفورماتور:

$$k = 2400/5, B_s = 1.9T, L_s = 0.7mH,$$

$$A = 3.53e^{-3}m^2, \psi_s = 1.34wb * turns,$$

$$i_{\mu 0} = 0.03mA, R = 0.15\Omega$$

حال طبق الگوریتم رونگه کوتاه و با توجه به روابط

(۱۱) و (۱۶) و (۲۱) ψ_{μ} به دست می‌آید. در حل

معادلات به کمک الگوریتم رونگه کوتاه فاصله زمانی ۱۰

میکروثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۶ منحنی ψ_{μ} بر

حسب زمان پس از برق‌دار کردن ترانسفورماتور را نشان

می‌دهد. پس از یافتن ψ_{μ} به کمک رابطه (۷) جریان

مغناطیس‌کنندگی هسته (i_{μ}) که براساس رابطه (۵) همان

جریان اولیه ترانسفورماتور قدرت i_1 است، به دست می‌آید

که در شکل (۷) نشان داده شده و می‌توان با مرجع [۶]

مقایسه کرد.

۵- شبیه‌سازی پدیده فوق اشباع

فرض می‌شود ترانسفورماتور از سمت فشار قوی در

لحظه $t = 0$ برق‌دار شود. پارامترهای مربوط به منبع

به صورت زیر است:

$$V_s(t) = V \sin(\omega t + \theta), V = 110kV, \omega = 100\pi,$$

$$\theta = 0^\circ$$

که θ زاویه فاز A در لحظه‌ای است که ترانسفورماتور

به منبع ولتاژ متصل است. پارامترهای مربوط به

ترانسفورماتور قدرت به شرح ذیل است:

$$k = 110/35kV, L_1 = 0.5H, R_1 = 1.5\Omega,$$

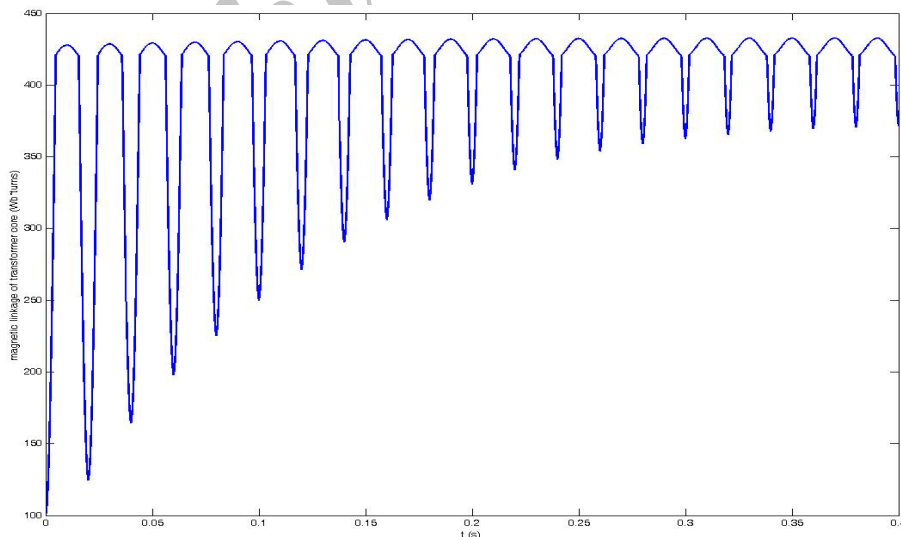
$$L_2 = 0.3H, R_2 = 10\Omega, L_{ss} = 0.01H,$$

$$R_{ss} = 0.3\Omega, \psi_m = U_m / \omega, \psi_s / \psi_m = 1.2,$$

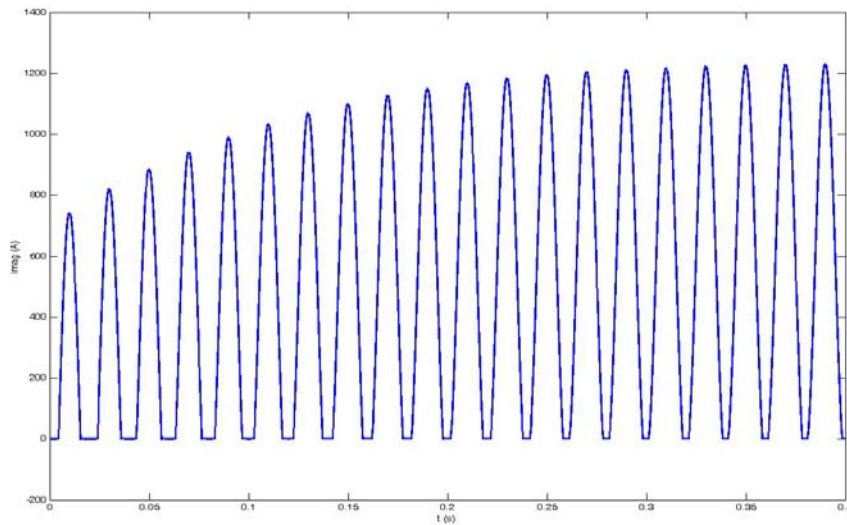
$$L_{\mu} = 700H, L_s = 0.01H, i_{\mu 0} = \psi_s / L_{\mu}$$

پارامترها برای ترانسفورماتور جریان در سمت فشار

قوی ترانسفورماتور:



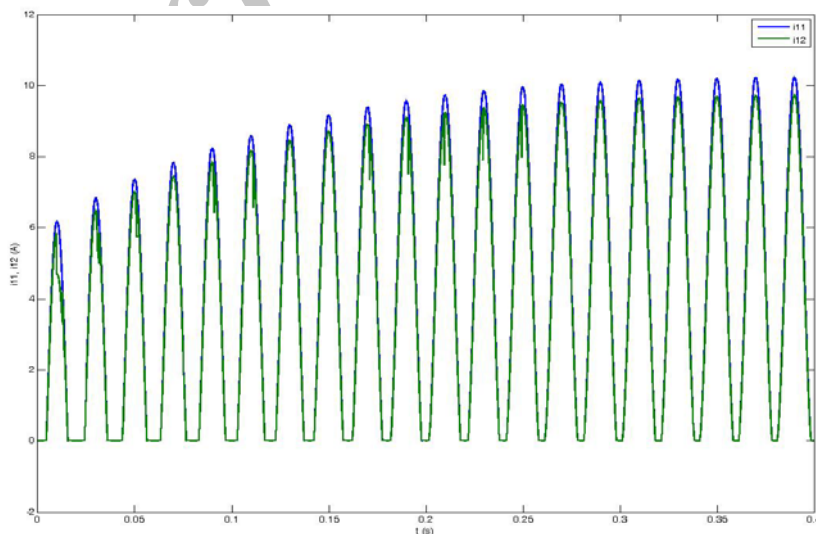
شکل (۶): شکل موج شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور



شکل (۷): شکل موج جریان شاخه مغناطیسی شونده ترانسفورماتور

رابطه (۷)، i_{μ} و سپس طبق روابط (۲۹)، (۳۳) و (۳۷) جریان ثانویه ترانسفورماتورهای جریان (i_s) به دست می‌آید. در این روابط i_{ps} همان جریان i_1 ترانسفورماتور قدرت است. در شکل (۸) جریان اولیه ارجاع داده شده به سمت ثانویه و جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان در طرف اولیه ترانسفورماتور قدرت و به ترتیب با i_{11} و i_{12} نشان داده شده‌اند.

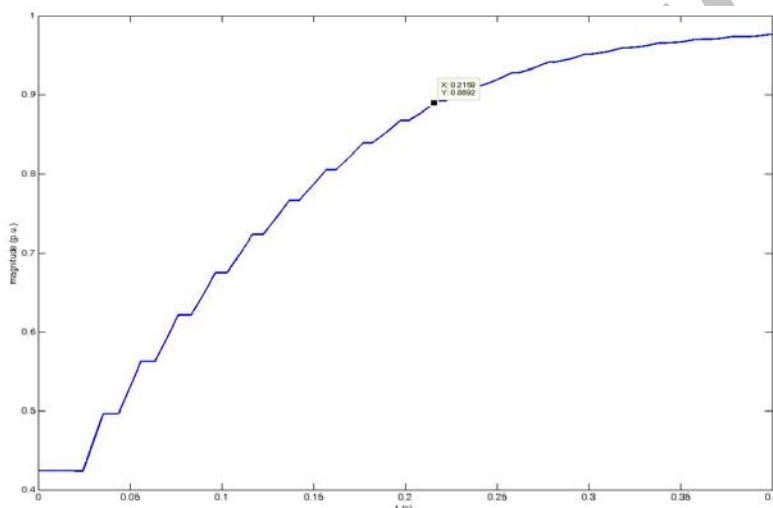
i_1 ، جریان اولیه ترانسفورماتور جریان در طرف اولیه ترانسفورماتور قدرت (همان جریان مغناطیس‌کنندگی هسته) است. اکنون باید جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان در سمت اولیه ترانسفورماتور قدرت را به دست آورد. با استفاده از الگوریتم رونگه کوتاه و با توجه به روابط (۳۱) و (۳۵) و (۳۹) مربوط به ترانسفورماتور جریان در طرف اولیه به دست می‌آید. در این الگوریتم فاصله زمانی ۱۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. پس از یافتن i_{μ} طبق



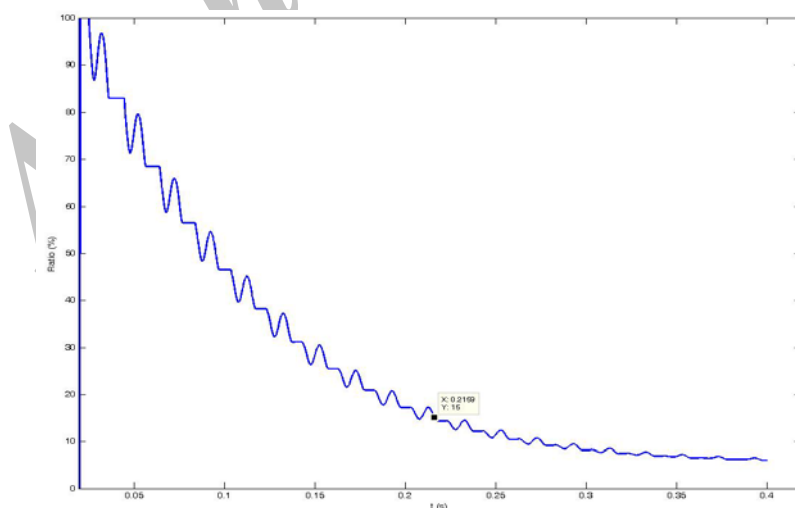
شکل (۸): مشخصه تبدیل شده ترانسفورماتور جریان در سمت اولیه ترانسفورماتور قدرت

می‌رسد. بنابراین، در این شرایط، i_{12} همان جریان دیفرانسیل است. شکل (۹) تغییرات دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل شکل ۸ را نشان می‌دهد که با تبدیل فوریه گسسته به دست آمده است. در این شکل دامنه جریان اصلی مؤلفه دیفرانسیل براساس جریان ثانویه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه نرمالیزه شده است. شکل ۱۰ نسبت تغییر هارمونیک مرتبه دوم به اصلی جریان هجوم مغناطیسی پس از برق‌دار کردن را نشان می‌دهد که با تبدیل فوریه گسسته به دست آمده است.

در مطالعات قبلی پدیده فوق‌اشباع در ترانسفورماتور قدرت باردار بررسی شده و در صورتی که دو معیار دامنه جریان تفاضلی و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان تفاضلی به طور همزمان از مقدار آستانه تنظیم‌شان تجاوز کنند، حفاظت دیفرانسیل به طور ناخواسته عملکرد خواهد داشت، اما در این مقاله، با توجه به اینکه ترانسفورماتور بدون بار و جریان ثانویه صفر است، بنابراین جریان اولیه ارجاع داده شده به سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان در سمت اولیه ترانسفورماتور قدرت به پای رله دیفرانسیل



شکل (۹): دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل



شکل (۱۰): نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک مرتبه اول جریان دیفرانسیل

۰/۲۱۵۹ ثانیه به زیر ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، اگر حفاظت دیفرانسیل ۰/۲۵ به‌عنوان آستانه عملکرد و ۱۵ درصد به عنوان نسبت محدودیت هارمونیک ۲ استفاده کند

با توجه به شکل ۹ دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل از ابتدای برق‌دار کردن بالای ۰/۲۵ پریونیت است و با توجه به شکل (۱۰) نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه در زمان

باقیمانده و تغییر زاویه شروع هدایت در این مقاله آورده شده است. شکل (۱۱) تغییرات دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به ازای زاویه شروع هدایت ۸۰ درجه و شار باقیمانده ۱۰۰ و بر را نشان می‌دهد و شکل (۱۲) نسبت تغییر هارمونیک مرتبه دوم به اصلی جریان دیفرانسیل پس از برق‌دار کردن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل از ابتدای برق‌دار کردن بالای ۰/۲۵ پریونیت است و با توجه به شکل (۱۲) نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه در زمان ۰/۳۸۰۹ ثانیه به زیر ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، اگر حفاظت دیفرانسیل ۰/۲۵ به عنوان آستانه عملکرد و ۱۵ درصد به عنوان نسبت محدودیت هارمونیک ۲ استفاده کند، عملکرد ناخواسته در زمان ۰/۳۸۰۹ ثانیه رخ می‌دهد. همچنین، شکل (۱۳) تغییرات دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به ازای زاویه شروع هدایت صفر درجه و شار باقیمانده صفر را نشان می‌دهد و شکل (۱۴) نسبت تغییر هارمونیک مرتبه دوم به اصلی جریان دیفرانسیل پس از برق‌دار کردن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳) دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل از ابتدای برق‌دار کردن بالای ۰/۲۵ پریونیت است و با توجه به شکل (۱۴) نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه در زمان ۰/۲۲۹۷ ثانیه به زیر ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت نیز اگر حفاظت دیفرانسیل ۰/۲۵ به عنوان آستانه عملکرد و ۱۵ درصد به عنوان نسبت محدودیت هارمونیک ۲ استفاده کند عملکرد ناخواسته در زمان ۰/۲۲۹۷ ثانیه رخ می‌دهد. بنابراین، عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت بر اثر پدیده فوق‌اشباع به دو پارامتر شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت بستگی دارد.

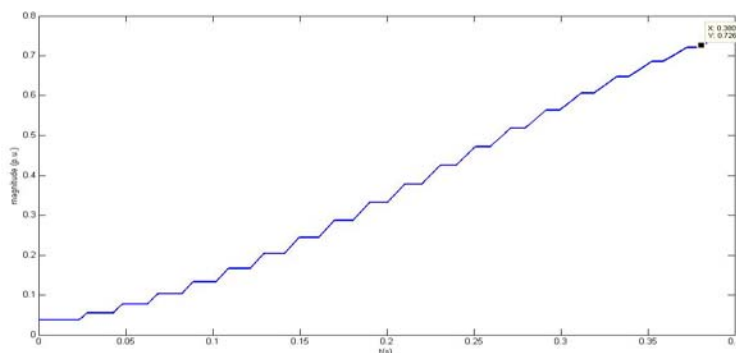
جدول (۱): سناریوهای مختلف به ازای تغییر زاویه شروع

هدایت

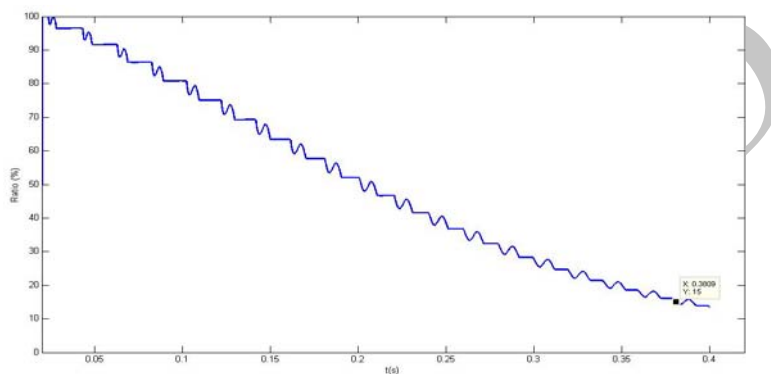
| θ ($^{\circ}$) | $\psi_{\mu}(0)$ (wb) | m (p.u.) | t_a (s) | t_{trip} (s) |
|----------------------------|-------------------------|---------------|--------------|-------------------|
| ۰ | ۱۰۰ | ۰/۸۸۹۲ | ۰/۲۱۵۹ | ۰/۲۱۵۹ |
| ۲۰ | ۱۰۰ | ۰/۸۴۰۴ | ۰/۲۸۴۳ | ۰/۲۸۴۳ |
| ۴۰ | ۱۰۰ | ۰/۷۹۳۷ | ۰/۳۲۰۹ | ۰/۳۲۰۹ |
| ۶۰ | ۱۰۰ | ۰/۷۵۱۶ | ۰/۳۵۴۳ | ۰/۳۵۴۳ |
| ۸۰ | ۱۰۰ | ۰/۷۲۶۱ | ۰/۳۸۰۹ | ۰/۳۸۰۹ |

عملکرد ناخواسته در زمان ۰/۲۱۵۹ ثانیه رخ می‌دهد. همچنین، پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق‌اشباع به پارامترهای متنوعی بستگی دارد که از مهمترین این پارامترها می‌توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد. به طور کلی، الگوریتم عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت بر اثر پدیده فوق‌اشباع در شبیه‌سازی‌های انجام شده به این صورت است که ابتدا جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت به دست آورده می‌شود و سپس جریان ثانویه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت محاسبه می‌شود. جریان دیفرانسیل از تفاضل جریان‌های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت به دست آورده می‌شود. در مرحله بعد، دامنه حالت ماندگار مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به کمک تبدیل فوریه گسسته محاسبه شده و در صورتی که دامنه مؤلفه حالت ماندگار از ۰/۲۵ پریونیت کمتر باشد، عملکرد رله بلوک خواهد شد، اما در صورتی که دامنه حالت ماندگار از ۰/۲۵ پریونیت بیشتر باشد، نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل به کمک تبدیل فوریه گسسته محاسبه می‌شود. در صورتی که این نسبت از ۱۵ درصد بزرگتر باشد عملکرد رله دوباره بلوک خواهد شد. اما در صورتی که نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه از ۱۵ درصد کوچکتر شود، عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل رخ می‌دهد. بنابراین، در صورتی که به طور همزمان دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل از ۰/۲۵ پریونیت بیشتر و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه از ۱۵ درصد کوچکتر باشد، حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق‌اشباع عملکرد ناخواسته خواهد داشت. در شبیه‌سازی‌های قبلی زاویه شروع هدایت صفر درجه و شار باقیمانده چنانکه در شکل ۵ نشان داده شده، ۱۰۰ ویر است. در این مقاله به ازای سناریوهای مختلف تغییر شار باقیمانده و تغییر زاویه شروع هدایت عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بررسی شده است. در جدول (۱) و (۲) به ترتیب سناریوهای مختلفی به ازای تغییر زاویه شروع هدایت و تغییر شار باقیمانده برای بررسی پدیده فوق‌اشباع با وجود امپدانس یا بار اضافی در اولیه ترانسفورماتور آورده شده است. از ۱۰ حالت شبیه‌سازی شده در جدول (۱) و (۲)، دو نمونه از شبیه‌سازی‌های انجام شده به ازای تغییر شار

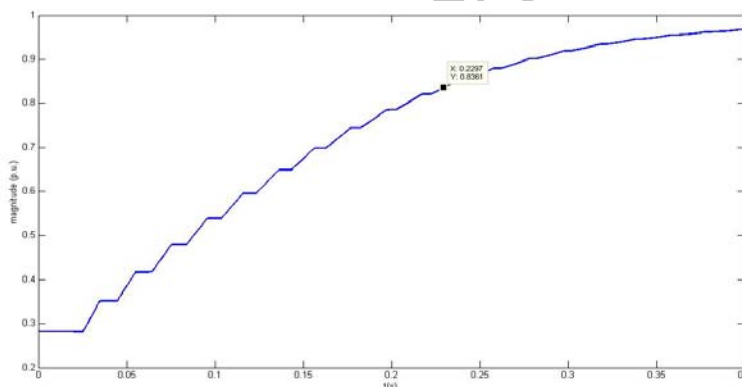
تعیین مدلی جدید بر اساس الگوریتم تبدیل فوریه گسسته برای مطالعه پدیده فوق اشباع در طی برق‌دار کردن.....



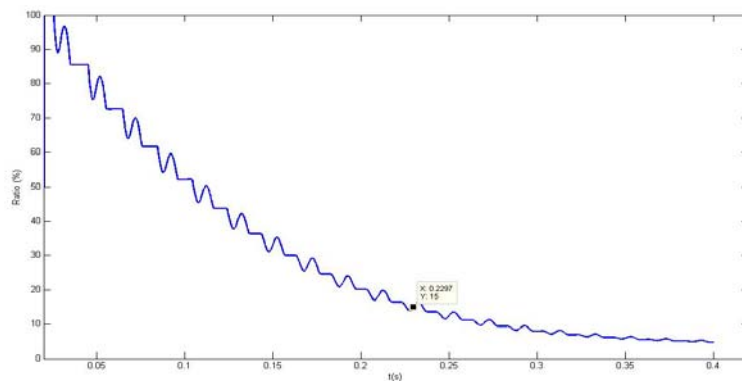
شکل (۱۱): دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به ازای زاویه شروع هدایت ۸۰ درجه و شار باقیمانده ۱۰۰ و بر



شکل (۱۲): نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک مرتبه اول جریان دیفرانسیل به ازای زاویه شروع هدایت ۸۰ درجه و شار باقیمانده ۱۰۰ و بر



شکل (۱۳): دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل به ازای زاویه شروع هدایت صفر درجه و شار باقیمانده صفر



شکل ۱۴: نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک مرتبه اول جریان دیفرانسیل به ازای زاویه شروع هدایت صفر درجه و شار باقیمانده

صفر

اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور است. در صورتی که امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور قدرت وجود نداشته باشد، به ازای زاویه شروع هدایت صفر درجه و شار باقیمانده ۱۰۰ و بر نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان مغناطیس شونددگی همیشه بالاتر از مقدار آستانه است و عملکرد ناخواسته اتفاق نمی‌افتد. شکل (۱۵) نسبت تغییر هارمونیک مرتبه دوم به اصلی جریان هجوم مغناطیسی پس از برق‌دار کردن به کمک تبدیل فوریه گسسته را در این شرایط نشان می‌دهد.

برای بررسی عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در ترانسفورماتور قدرت بدون بار و بدون امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه به ازای سناریوهای مختلفی که در جدول (۱) و (۲) آمده است، حفاظت دیفرانسیل عملکرد نخواهد داشت و در بدترین حالت نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه بالاتر از ۲۰ درصد است.

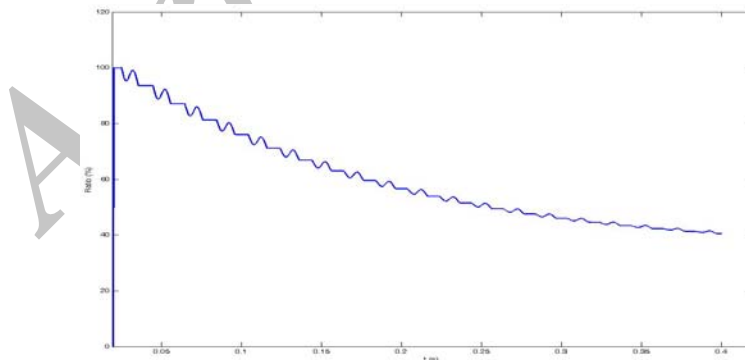
جدول (۳): نتایج حاصل از سناریوهای مختلف

| سناریوها | تغییرات سناریوها | زمان عملکرد حفاظت دیفرانسیل |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| تغییر زاویه هدایت | افزایش زاویه شروع هدایت | افزایش |
| تغییر شار باقیمانده | افزایش شار باقیمانده | کاهش |

جدول (۲): سناریوهای مختلف به ازای تغییر شار باقیمانده

| $\psi_{\mu}(0)$ (wb) | θ ($^{\circ}$) | m (p.u.) | t_a (s) | t_{trip} (s) |
|-------------------------|----------------------------|---------------|--------------|-------------------|
| -۱۰۰ | ۰ | ۰/۷۷۵۳ | ۰/۲۹۵۸ | ۰/۲۹۵۸ |
| -۵۰ | ۰ | ۰/۷۹۷۷ | ۰/۲۷۶۵ | ۰/۲۷۶۵ |
| ۰ | ۰ | ۰/۸۳۶۱ | ۰/۲۲۹۷ | ۰/۲۲۹۷ |
| ۵۰ | ۰ | ۰/۸۵۶۲ | ۰/۲۲۴ | ۰/۲۲۴ |
| ۱۰۰ | ۰ | ۰/۸۸۹۲ | ۰/۲۱۵۹ | ۰/۲۱۵۹ |

در جدول ۱ و ۲، m ، t_a و t_{trip} به ترتیب دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل برحسب پریونیت هنگامی که نسبت هارمونیک مرتبه دوم به اصلی جریان دیفرانسیل به ۱۵ درصد می‌رسد، زمان رسیدن نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل به ۱۵ درصد و زمان قطع حفاظت دیفرانسیل است. با توجه به جدول (۱)، بدترین حالت هجوم در زاویه شروع هدایت صفر اتفاق می‌افتد و هرچه زاویه شروع هدایت بزرگتر می‌شود، زمان قطع حفاظت دیفرانسیل افزایش می‌یابد. همچنین، هرچه شار باقیمانده در ترانسفورماتور بیشتر باشد، زمان قطع حفاظت دیفرانسیل کاهش می‌یابد که در جدول (۲) نشان داده شده است. به‌طور کلی، نتایج حاصل از سناریوهای مختلف در جدول ۳ آورده شده است. همچنین، علاوه بر شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت، یکی از عواملی که می‌تواند باعث عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل شود، وجود امپدانس یا بار



شکل (۱۵): نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک مرتبه اول جریان دیفرانسیل

آن بر حفاظت دیفرانسیل ارائه شد. در این مدل، علاوه بر غیرخطی بودن شاخه مغناطیس شونددگی، اثر ترانسفورماتور جریان در نظر گرفته شد و امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه به صورت مختلط ($R-L$) در نظر گرفته شد. همچنین، در این مقاله پدیده فوق اشباع در هنگام برق‌دار

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل جدیدی بر اساس الگوریتم تبدیل فوریه گسسته برای بررسی پدیده فوق اشباع در هنگام برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار به همراه امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور و تاثیر

فهرست علائم

| | |
|--------------|--|
| V_S | نیرو محرکه اجباری منبع |
| R_{SS} | مقاومت منبع |
| L_{SS} | اندوکتانس منبع |
| R_1 | مقاومت سیم‌پیچ اولیه |
| L_1 | اندوکتانس نشتی سیم پیچ اولیه |
| R_2 | مقاومت امپدانس یا بار اضافی در اولیه ترانسفورماتور |
| قدرت | |
| L_2 | اندوکتانس امپدانس یا بار اضافی در اولیه ترانسفورماتور قدرت |
| L_{μ} | اندوکتانس شاخه مغناطیس‌شوندگی |
| ψ_{μ} | شار پیوندی |
| ψ_S | شار پیوندی در نقطه زانو از منحنی مغناطیس‌کنندگی |
| $i_{\mu 0}$ | جریان مغناطیس‌کنندگی در نقطه زانوی از منحنی مغناطیس‌کنندگی |
| L_S | شیب اشباع منحنی مغناطیس‌کنندگی |
| i_{ps} | جریان اولیه ارجاع شده به سمت ثانویه |
| i_{μ} | جریان مغناطیس‌کنندگی |
| i_s | جریان ثانویه |
| N_p | تعداد دورهای اولیه |
| N_s | تعداد دورهای ثانویه |
| e_s | ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ ثانویه |
| θ | زاویه فاز A در لحظه‌ای وصل ترانسفورماتور به منبع |
| ولتاژ | |
| i_{11} | جریان اولیه ارجاع داده شده به سمت ثانویه ترانسفورماتور قدرت |
| i_{12} | جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان در طرف اولیه ترانسفورماتور قدرت |
| m | دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل برحسب پریونیت هنگام رسیدن هارمونیک مرتبه دوم به اصلی جریان دیفرانسیل به ۱۵ درصد |
| t_a | زمان رسیدن نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل به ۱۵ درصد |
| t_{trip} | زمان عملکرد حفاظت دیفرانسیل |

کردن ترانسفورماتور قدرت بدون بار با و بدون امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه ترانسفورماتور بررسی شد و تاثیر آنها بر حفاظت دیفرانسیل مقایسه گردید. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع به پارامترهای متنوعی بستگی دارد که از مهمترین این پارامترها می‌توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد که در این مقاله به ازای سناریوهای مختلف برای ترانسفورماتور قدرت بدون بار با و بدون امپدانس یا بار اضافی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل علاوه بر شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت، به امپدانس یا بار اضافی در سمت اولیه نیز بستگی دارد.

مراجع

- [1] Mathews, C. A., "An improved transformer differential relay", AIEE Trans., Vol. 73, No.3, pp. 645-650, 1954.
- [2] Specht, T. R., "Transformer magnetizing inrush current", AIEE Trans., Vol. 70, No.1, pp. 323-328, 1951.
- [3] Wiszniewski, A., Ungrad, H., Winkler, W., Protection Techniques in Electrical Energy Systems, New York: Marcel Dekker, 1995.
- [4] Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors and Mini Bus bars, Instruction Manual, SIEMENS AG, 2006.
- [5] Lin, X., Liu, P., "The Ultra-Saturation Phenomenon of Loaded Transformer Energization and Its Impacts on Differential Protection", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1265-1272, 2005.
- [6] Wiszniewski, A., Rebizant, W., Bejmert, D., Schiel, L., "Ultra saturation Phenomenon in Power Transformers—Myths and Reality", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 23, No. 3, pp-1327-1334, 2008.
- [7] Weng, H., Lin, X., Liu, P., "Studies on the Operation Behavior of Differential Protection during a Loaded Transformer Energization", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 22, No. 3, pp-1386-1391, 2007.
- [8] Naidu, M., Swift, G.W., "Dynamic Analysis of a current Transformer during Faults", Electric Power System Research, pp 225-231, 1986.