

تعیین یک مدل جدید برای مطالعه پدیده فوق اشباع در طول برق دار کردن ترانسفورماتور قدرت سه فاز باردار و تأثیر آن بر حفاظت دیفرانسیل

بهرام نوشاد، مرتضی رزاز و سید قدرت اله سیف السادات

جریان کوچک تر می شود و درصد هارمونیک مرتبه دوم به پایین تر از سطح مهارکننده رله افت می کند [۳] تا [۵]. در این حالت، شکل موج جریان AC تقریباً شکل خود را حفظ می کند و سطح هارمونیک مرتبه دوم، ناچیز است. مکانیسم عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع مربوط به اشباع هسته های مغناطیسی ترانسفورماتورهای قدرت در طول رخ دادن یک جهش ناگهانی در ولتاژ ترمینال ها می باشد که پدیده ای کاملاً شناخته شده است. این اتفاقات در طول برق دار کردن ترانسفورماتور یا پس از رفع خطای اتصال کوتاه نزدیک ترانسفورماتور رخ می دهند. در این دو حالت ممکن است جریان های هجومی با میرایی زیاد و نسبتاً آهسته ای رخ دهند که ممکن است چندین بار بیشتر از مقدار نامی آن ها باشد. به عنوان یک نتیجه، یک هارمونیک مرتبه دوم ذاتی همیشه در جریان، حتی در موارد فوق اشباع خیلی بزرگ، هنگامی که شار باقیمانده در هسته پلاریته ای مشابه با شار DC دارد، وجود دارد که تقریباً زیر ۱۵ درصد مقدار اصلی افت نمی کند. بنابراین وجود هارمونیک دوم یک معیار مهارکننده در رله های دیفرانسیل می باشد. اگر رله تشخیص دهد که هارمونیک دوم بیشتر از ۱۵ تا ۲۰ درصد مؤلفه اصلی است، آن گاه عملکرد رله بلوک می شود. با این حال، در شرایط خاصی عملکرد ناخواسته رله های دیفرانسیل تحت شرایط جریان هجومی گزارش شده است. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع به فاکتورهای متنوعی مانند نقطه زانویی منحنی اشباع، شار باقیمانده، زاویه شروع و ... بستگی دارد. در حالت فوق اشباع، جریان هجومی، مشخصاتی مانند زاویه مرده و درصد بالایی از میزان هارمونیک مرتبه دوم را در طول پریود فوق اشباع از دست خواهد داد. در حفاظت های دیفرانسیل از ویژگی های نامنظم شکل موج جریان هجومی مانند عدم تقارن، زاویه مرده، هارمونیک و یا تغییرات شار بین اشباع و غیر اشباع به عنوان طرح های بلوک کننده استفاده می شود که در طول پریود فوق اشباع این ویژگی ها را از دست خواهند داد و عملکرد ناخواسته رخ می دهد. برای مطالعه پدیده فوق اشباع و تقویت تئوری آنالیز گذرای ترانسفورماتور در [۳] تا [۵]، یک مدل برای برق دار کردن ترانسفورماتور باردار در نظر گرفته شده و با به کارگیری این مدل عملکرد ناخواسته تأخیری حفاظت دیفرانسیل تشریح شده است. در [۳] ساده سازی های زیادی انجام شده است که می توان به در نظر گرفتن راکتانس مغناطیسی کنندگی از مشخصه مختلف زمان تحت عنوان یک اندوکتانس معادل، چشم پوشی کردن از مدل هسته ترانسفورماتور، در نظر نگرفتن تأثیر ترانسفورماتور جریان برای جریان هجومی اولیه و در نظر گرفتن بار به صورت مقاومتی خالص اشاره کرد که با وضعیت واقعی منطبق نیست. یک مدل جدید برای تجزیه و تحلیل گذرای برق دار کردن ترانسفورماتور باردار در سال ۲۰۰۷ توسط Lin پیشنهاد شد [۴]. در این مدل شاخه مغناطیسی شونده گی به صورت

چکیده: یکی از عملکردهای ناخواسته حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور در طی برق دار کردن ترانسفورماتور قدرت باردار رخ می دهد که به آن پدیده فوق اشباع می گویند. در این مقاله پدیده فوق اشباع در طول برق دار کردن ترانسفورماتور قدرت سه فاز باردار بررسی شده و تأثیر آن بر عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل مطالعه می شود. برای مدل کردن پدیده فوق اشباع، غیر خطی بودن شاخه مغناطیسی شونده گی، اثر اشباع ترانسفورماتورهای جریان و مختلط بودن بار در نظر گرفته می شود. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در اثر پدیده فوق اشباع به فاکتورهای متنوعی بستگی دارد که از مهم ترین این پارامترها می توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد که در این مقاله به ازای سناریوهای مختلف بررسی می شود. برای انجام مطالعات از نرم افزار MATLAB استفاده می شود.

کلید واژه: حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت سه فاز، پدیده فوق اشباع، جریان هجومی، عملکرد ناخواسته.

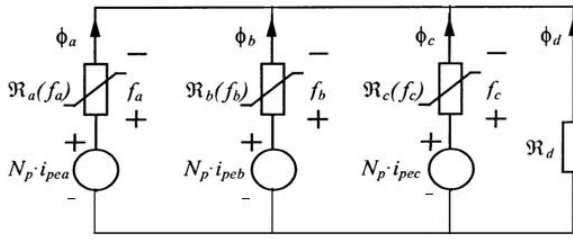
۱- مقدمه

رله های دیفرانسیل به عنوان یکی از حفاظت های با عملکرد سریع برای سالیان متمادی برای حفاظت ترانسفورماتور قدرت مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. با این حال این رله در مواجهه با پدیده جریان هجومی ممکن است دچار عملکرد ناخواسته گردد. پدیده جریان هجومی پدیده ای گذرا در سیستم قدرت می باشد که در زمان برق دار کردن ترانسفورماتور در سمت اولیه اتفاق می افتد [۲]. معمولاً برای تمایز بین خطای داخلی و جریان هجومی از این الگوریتم استفاده می شود که اگر دامنه حالت ماندگار بیشتر از ۰/۲۵ پریونیت و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه کمتر از ۱۵ درصد شود رله دیفرانسیل عمل می کند [۳] تا [۷]. اما در شرایط خاصی عملکرد ناخواسته رله های دیفرانسیل تحت شرایط جریان هجومی گزارش شده که این کار موجب قطع ترانسفورماتورهای سالم گردیده که ناشی از پدیده ای به نام فوق اشباع بوده است [۳] تا [۵]. محققان مشاهده کرده اند که برق دار کردن یک ترانسفورماتور باردار ممکن است زمانی منجر به پدیده فوق اشباع شود که شار DC در هسته در مرحله اولیه از فرایند به جای کاهش، افزایش یابد [۳]. در نتیجه، اعوجاج شکل موج های این مقاله در تاریخ ۱ شهریور ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۸ خرداد ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

بهرام نوشاد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز (email: bahramnoshad@yahoo.com).

مرتضی رزاز، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز (email: razaz_m@scu.ac.ir).

سید قدرت اله سیف السادات، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز (email: seifossadat@yahoo.com).



شکل ۲: مدار معادل مغناطیسی ترانسفورماتور قدرت سه فاز.

$$-N_p i_{pec} + f_c - \mathfrak{R}_d \phi_d = 0 \quad (3)$$

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c + \phi_d = 0 \quad (4)$$

با در نظر گرفتن منحنی اشباع، در شکل ۲ رلوکتانس‌های a ، b و c غیر خطی می‌باشند که بر اساس [۸] به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$\mathfrak{R}_a(f_a)^{-1} = \frac{k_{\nu a}}{\left(1 + \left(\frac{|f_a|}{f_a}\right)^{p_a}\right)^{\frac{1}{p_a}}} + k_{\nu a} \quad (5)$$

$$\mathfrak{R}_b(f_b)^{-1} = \frac{k_{\nu b}}{\left(1 + \left(\frac{|f_b|}{f_b}\right)^{p_b}\right)^{\frac{1}{p_b}}} + k_{\nu b} \quad (6)$$

$$\mathfrak{R}_c(f_c)^{-1} = \frac{k_{\nu c}}{\left(1 + \left(\frac{|f_c|}{f_c}\right)^{p_c}\right)^{\frac{1}{p_c}}} + k_{\nu c} \quad (7)$$

با توجه به شکل ۲ داریم

$$f_a = \mathfrak{R}_a(f_a) \cdot \phi_a \quad (8)$$

$$f_b = \mathfrak{R}_b(f_b) \cdot \phi_b \quad (9)$$

$$f_c = \mathfrak{R}_c(f_c) \cdot \phi_c \quad (10)$$

بر اساس (۵) تا (۱۰) داریم

$$\phi_a = \left(\frac{k_{\nu a}}{\left(1 + \left(\frac{|f_a|}{f_a}\right)^{p_a}\right)^{\frac{1}{p_a}}} + k_{\nu a} \right) \cdot f_a \quad (11)$$

$$\phi_b = \left(\frac{k_{\nu b}}{\left(1 + \left(\frac{|f_b|}{f_b}\right)^{p_b}\right)^{\frac{1}{p_b}}} + k_{\nu b} \right) \cdot f_b \quad (12)$$

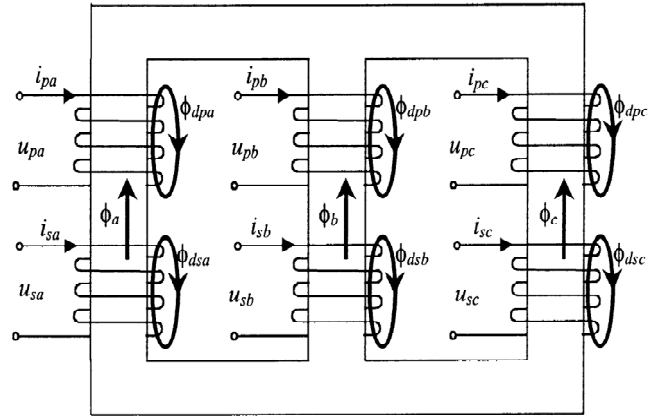
$$\phi_c = \left(\frac{k_{\nu c}}{\left(1 + \left(\frac{|f_c|}{f_c}\right)^{p_c}\right)^{\frac{1}{p_c}}} + k_{\nu c} \right) \cdot f_c \quad (13)$$

با توجه به این که اکثر ترانسفورماتورهای قدرت سه فاز دارای اتصال اولیه ستاره زمین شده و ثانویه مثلث (YNd11) می‌باشند مدار معادل الکتریکی آنها به صورت شکل ۳ است که بر اساس آن می‌توان نوشت

$$u_{pa} = R_p i_{pa} + L_{dp} \frac{di_{pa}}{dt} + N_p \frac{d\phi_a}{dt} \quad (14)$$

$$u_{pb} = R_p i_{pb} + L_{dp} \frac{di_{pb}}{dt} + N_p \frac{d\phi_b}{dt} \quad (15)$$

$$u_{pc} = R_p i_{pc} + L_{dp} \frac{di_{pc}}{dt} + N_p \frac{d\phi_c}{dt} \quad (16)$$



شکل ۱: شمای کلی ترانسفورماتور سه فاز سه ستونه.

غیر خطی در نظر گرفته شد و اثر ترانسفورماتور جریان مد نظر قرار گرفته و همچنین بار به صورت مقاومتی و سلفی فرض گردید. در این مرجع 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 هیستریزیس می‌باشد. در سال ۲۰۰۸ Wiszniewski و همکارانش [۵] شرایطی را که باعث به وجود آمدن پدیده فوق اشباع می‌شوند، شرح داده‌اند. برای انجام این کار از نرم‌افزار ATP - EMTP استفاده شد و در این مدل علاوه بر این که از مدل هسته ترانسفورماتور صرف نظر شده از شاخه مغناطیس‌کنندگی نیز صرف نظر شده که منطبق بر واقعیت نمی‌باشد. در تمامی مطالعات پدیده فوق اشباع، ترانسفورماتور قدرت به صورت تک‌فاز در نظر گرفته شده‌اند [۳] تا [۵].

در این مقاله پدیده فوق اشباع در طول برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز باردار بررسی شده و تأثیر آن بر عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل مطالعه می‌شود. برای مدل کردن پدیده فوق اشباع ویژگی‌هایی مثل غیر خطی بودن شاخه مغناطیس‌شوندگی، اثر اشباع ترانسفورماتورهای جریان و مختلط بودن بار در نظر گرفته می‌شود. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در اثر پدیده فوق اشباع به فاکتورهای 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 بررسی می‌شود. واضح است که تشخیص پدیده فوق اشباع گامی مهم به سوی عملکرد صحیح حفاظت دیفرانسیل است که می‌توان حالت‌هایی غیر معمول که در حال حاضر در تجهیزات و رله به کار برده می‌شوند، را بهتر کنترل کرد. برای انجام مطالعات از نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود.

۲- مدل‌سازی پدیده فوق اشباع

۱-۲ مدل‌سازی برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت

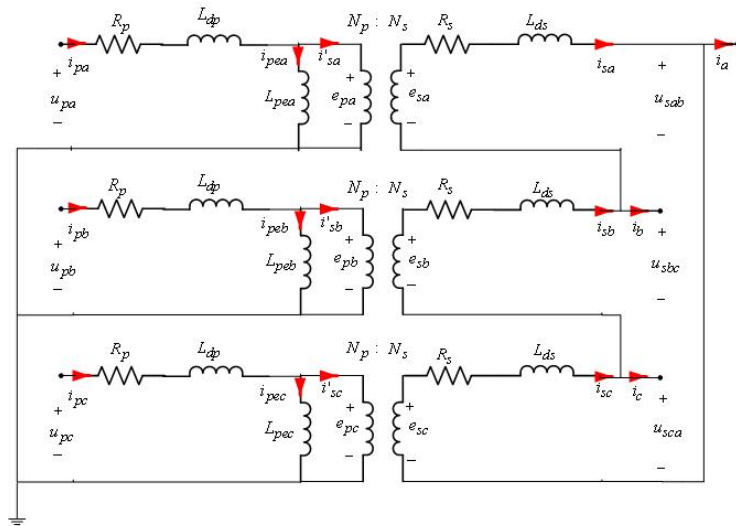
سه‌فاز باردار

مدل‌سازی ترانسفورماتور با استفاده و ترکیب هم‌زمان مدارهای مغناطیسی و الکتریکی همیشه نتایج مطلوبی را داشته است. شمای کلی ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز، دو سیم‌پیچ و سه ستونه در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ مدار معادل مغناطیسی ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز سه ستونه شکل ۱ نشان داده شده است.

طبق مدار معادل مغناطیسی شکل ۲ داریم

$$-N_p i_{pea} + f_a - \mathfrak{R}_d \phi_d = 0 \quad (1)$$

$$-N_p i_{peb} + f_b - \mathfrak{R}_d \phi_d = 0 \quad (2)$$



شکل ۳: مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز با اتصال اولیه ستاره زمین شده و ثانویه مثلث.

$$\begin{aligned}
 -R_s i_{sc} - L_{ds} \frac{di_{sc}}{dt} + N_s \frac{d\phi_c}{dt} \\
 = R_b (i_{sc} - i_{sb}) + L_b \frac{d(i_{sc} - i_{sb})}{dt} \quad (28) \\
 -R_b (i_{sa} - i_{sc}) - L_b \frac{d(i_{sa} - i_{sc})}{dt}
 \end{aligned}$$

همچنین طبق مدار معادل شکل ۳ داریم

$$\begin{aligned}
 i_{pa} &= i_{pea} + \frac{N_s}{N_p} i_{sa} \\
 i_{pb} &= i_{peb} + \frac{N_s}{N_p} i_{sb} \quad (29) \\
 i_{pc} &= i_{pec} + \frac{N_s}{N_p} i_{sc}
 \end{aligned}$$

با توجه به (۲۹) ، $N_p \cdot i_{pea} = N_p \cdot (i_{pa} - (N_s/N_p) \cdot i_{sa})$ و $N_p \cdot i_{peb} = N_p \cdot (i_{pb} - (N_s/N_p) \cdot i_{sb})$ و $N_p \cdot i_{pec} = N_p \cdot (i_{pc} - (N_s/N_p) \cdot i_{sc})$ تفاوت بین نیروی محرکه مغناطیسی اولیه و ثانویه می‌باشند که در شکل‌های ۱ تا ۳ نمایش داده شده‌اند. در (۱) تا (۲۹) ، i_{pa} ، i_{pb} ، i_{pc} ، i_{sa} ، i_{sb} ، i_{sc} و ولتاژها و جریان‌های سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ، R_p ، R_s ، L_{dp} و L_{ds} مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ، ϕ_a ، ϕ_b ، ϕ_c و شار مغناطیسی هسته ساق‌های سیم‌پیچ و شاخه هوایی ، N_p و N_s تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه ، e_{pa} ، e_{pb} ، e_{pc} ، e_{sa} ، e_{sb} ، e_{sc} و ولتاژهای القایی ساق‌های سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ، f_a ، f_b ، f_c و f_d پتانسیل مغناطیسی سرتاسر سه ساق و شاخه هوایی ، p_a ، p_b ، p_c ، k_{ra} ، k_{rb} ، k_{rc} ، k_{ra} ، k_{rb} ، k_{rc} ، k_{ra} ، k_{rb} ، k_{rc} مربوط به منحنی اشباع ترانسفورماتور و R_b و L_b مقاومت و اندوکتانس مربوط به بار ترانسفورماتور می‌باشند.

۲-۲ مدل‌سازی ترانسفورماتور جریان

مدار معادل یک ترانسفورماتور جریان در شکل ۴-الف نشان داده شده است. در این مدار R_1 و L_1 شامل مقاومت و اندوکتانس اولیه و شبکه می‌باشند. R_2 و L_2 مقاومت و اندوکتانس ثانویه ترانسفورماتور جریان، R_b و L_b مقاومت و اندوکتانس بار هستند. از آنجایی که مؤلفه تلفات هسته روی اشباع ترانسفورماتور جریان تأثیری ندارد از آن صرف نظر شده

$$u_{sab} = -R_s i_{sa} - L_{ds} \frac{di_{sa}}{dt} + N_s \frac{d\phi_a}{dt} \quad (17)$$

$$u_{sbc} = -R_s i_{sb} - L_{ds} \frac{di_{sb}}{dt} + N_s \frac{d\phi_b}{dt} \quad (18)$$

$$u_{sca} = -R_s i_{sc} - L_{ds} \frac{di_{sc}}{dt} + N_s \frac{d\phi_c}{dt} \quad (19)$$

برای مدل‌سازی پدیده فوق اشباع، ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز به صورت باردار در نظر گرفته شده و در این مقاله بار سه‌فاز متعادل به صورت مختلط $(R_b - L_b)$ می‌باشد. با اتصال بار مختلط $(R_b - L_b)$ به صورت ستاره به مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز در شکل ۳ و به کمک قوانین جریان و ولتاژ کیرشهف در ثانویه داریم

$$u_{sab} = R_b i_a + L_b \frac{di_a}{dt} - R_b i_b - L_b \frac{di_b}{dt} \quad (20)$$

$$u_{sbc} = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} - R_b i_c - L_b \frac{di_c}{dt} \quad (21)$$

$$u_{sca} = R_b i_c + L_b \frac{di_c}{dt} - R_b i_a - L_b \frac{di_a}{dt} \quad (22)$$

$$i_a = i_{sa} - i_{sc} \quad (23)$$

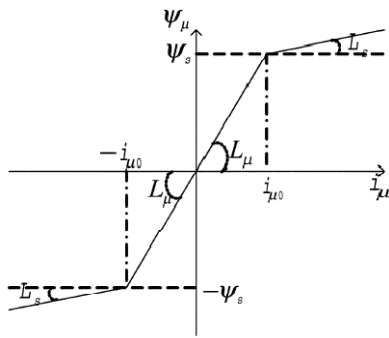
$$i_b = i_{sb} - i_{sa} \quad (24)$$

$$i_c = i_{sc} - i_{sb} \quad (25)$$

بر اساس (۱۷) تا (۲۵) داریم

$$\begin{aligned}
 -R_s i_{sa} - L_{ds} \frac{di_{sa}}{dt} + N_s \frac{d\phi_a}{dt} \\
 = R_b (i_{sa} - i_{sc}) + L_b \frac{d(i_{sa} - i_{sc})}{dt} \quad (26) \\
 -R_b (i_{sb} - i_{sa}) - L_b \frac{d(i_{sb} - i_{sa})}{dt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -R_s i_{sb} - L_{ds} \frac{di_{sb}}{dt} + N_s \frac{d\phi_b}{dt} \\
 = R_b (i_{sb} - i_{sa}) + L_b \frac{d(i_{sb} - i_{sa})}{dt} \quad (27) \\
 -R_b (i_{sc} - i_{sb}) - L_b \frac{d(i_{sc} - i_{sb})}{dt}
 \end{aligned}$$



شکل ۵: مشخصه تقریبی مغناطیس کننده هسته ترانسفورماتور.

با توجه به (۳۵) و (۳۶) داریم

$$i_s = i_{ps} - \frac{1}{L_s}(\psi_\mu - \psi_s) - i_\mu \quad (37)$$

از طرفین (۳۷) دیفرانسیل می‌گیریم

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_{ps}}{dt} - \frac{1}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \quad (38)$$

از آنجایی که $d\psi_\mu/dt = e_s$ ، طبق (۳۳) و (۳۷) داریم

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{RL_s}{L_s + L} (i_{ps} - \frac{\psi_\mu - \psi_s}{L_s} - i_\mu) + \frac{LL_s}{L_s + L} \frac{di_{ps}}{dt} \quad (39)$$

حالت دوم: $\psi_\mu < -\psi_s$

$$i_\mu = \frac{1}{L_s}(\psi_\mu + \psi_s) - i_\mu \quad (40)$$

با توجه به (۳۵) و (۴۰) داریم

$$i_s = i_{ps} - \frac{1}{L_s}(\psi_\mu + \psi_s) + i_\mu \quad (41)$$

از طرفین (۴۱) دیفرانسیل می‌گیریم

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_{ps}}{dt} - \frac{1}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \quad (42)$$

از آنجایی که $d\psi_\mu/dt = e_s$ ، طبق (۳۳) و (۴۱) داریم

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{RL_s}{L_s + L} (i_{ps} - \frac{\psi_\mu + \psi_s}{L_s} + i_\mu) + \frac{LL_s}{L_s + L} \frac{di_{ps}}{dt} \quad (43)$$

حالت سوم: $|\psi_\mu| \leq \psi_s$

$$i_\mu = i_\mu \frac{\psi_\mu}{\psi_s} \quad (44)$$

با توجه به (۳۵) و (۴۴) داریم

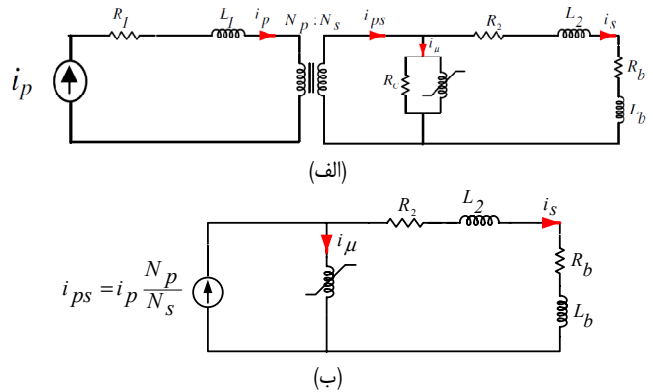
$$i_s = i_{ps} - i_\mu \frac{\psi_\mu}{\psi_s} \quad (45)$$

از طرفین (۴۵) دیفرانسیل می‌گیریم

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_{ps}}{dt} - \frac{i_\mu}{\psi_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \quad (46)$$

از آنجایی که $d\psi_\mu/dt = e_s$ ، طبق (۳۳) و (۴۵) داریم

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{R\psi_s}{\psi_s + i_\mu} (\frac{N_p}{N_s} i_{ps} - i_\mu \frac{\psi_\mu}{\psi_s}) + \frac{L\psi_s}{\psi_s + i_\mu} \frac{N_p}{N_s} \frac{di_{ps}}{dt} \quad (47)$$



شکل ۴: (الف) مدار معادل ترانسفورماتور جریان و (ب) مدار معادل ترانسفورماتور جریان ارجاع داده شده به سمت ثانویه.

[۹] و مدار معادل ترانسفورماتور جریان ارجاع داده شده به سمت ثانویه در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

برای مدل کردن مشخصات مغناطیسی ترانسفورماتور جریان از منحنی تقریبی نشان داده شده در شکل ۵ استفاده می‌شود. طبق شکل ۵ داریم

$$i_\mu = \begin{cases} \frac{\psi_\mu - \psi_s}{L_s} + i_\mu, & \psi_\mu > \psi_s \\ \frac{\psi_\mu + \psi_s}{L_s} - i_\mu, & \psi_\mu < -\psi_s \\ i_\mu \frac{\psi_\mu}{\psi_s}, & |\psi_\mu| \leq \psi_s \end{cases} \quad (30)$$

که در آن ψ_μ شار پیوندی، ψ_s شار پیوندی در نقطه زانو از منحنی مغناطیس کنندگی، i_μ جریان مغناطیس کنندگی در نقطه زانویی از منحنی مغناطیس کنندگی و L_s شیب اشباع منحنی مغناطیس کنندگی می‌باشد. برای مدل کردن ترانسفورماتور جریان، مدار معادل که در شکل ۴-ب نشان داده شده در نظر گرفته می‌شود. در این مدار معادل ابتدا پارامترهای زیر را تعریف می‌کنیم

$$\begin{aligned} R &= R_r + R_b \\ L &= L_r + L_b \end{aligned} \quad (31)$$

طبق مدار معادل نشان داده شده در شکل ۴-ب داریم

$$i_{ps} = i_\mu + i_s \quad (32)$$

$$e_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (33)$$

$$i_{ps} = \frac{N_p}{N_s} i_p \quad (34)$$

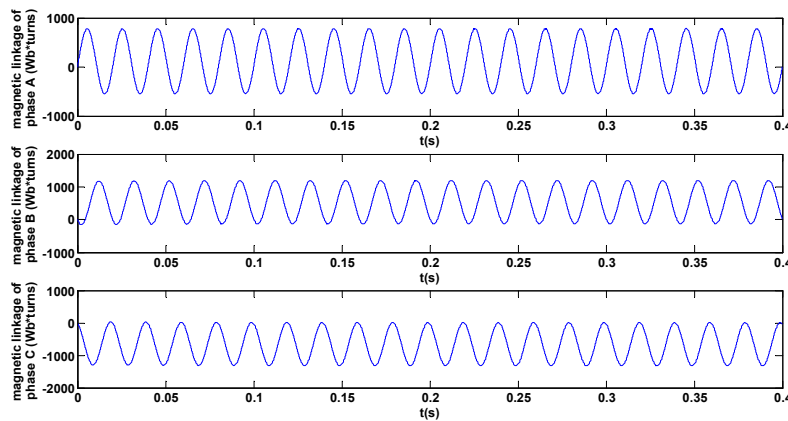
که در آن i_{ps} جریان اولیه ارجاع شده به سمت ثانویه، i_μ جریان مغناطیس کنندگی، i_s جریان ثانویه، N_p تعداد دورهای اولیه، N_s تعداد دورهای ثانویه و e_s ولتاژ القاشده در سیم‌پیچ ثانویه است. طبق (۳۲) داریم

$$i_s = i_{ps} - i_\mu \quad (35)$$

با در نظر گرفتن اشباع، منحنی مغناطیسی‌شوندگی نشان داده شده در شکل ۵ به سه ناحیه تقسیم می‌شود:

حالت اول: $\psi_\mu > \psi_s$

$$i_\mu = \frac{\psi_\mu - \psi_s}{L_s} + i_\mu \quad (36)$$



شکل ۶: شکل موج‌های شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور.

در این مقاله سعی شده از مقادیر واقعی برای ترانسفورماتور قدرت و ترانسفورماتورهای جریان استفاده شود. بنابراین همه مقادیر از شرکت ایران ترانسفو زنجان و [۳] تا [۵] گرفته شده است. برای مدل‌سازی پدیده فوق اشباع، بر اساس (۱) تا (۴)، (۱۱) تا (۱۶) و (۲۳) تا (۲۹) مجهولات $i_{pb}, i_{pa}, \phi_c, \phi_b, \phi_a, i_c, i_b, i_a, i_{pc}, i_{pb}, i_{pa}, i_{pc}, i_{pb}, i_{pa}$ و i_b, i_a, i_{pc} جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت می‌باشند. ترانسفورماتور قدرت و i_{pc} و i_b, i_a جریان‌های اولیه ترانسفورماتور قدرت در سمت اولیه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت می‌باشند. حال باید جریان‌های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان در سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت را به دست آورد. با استفاده از الگوریتم رونگه کوتا و با توجه به (۳۹)، (۴۳) و (۴۷) ψ_μ مربوط به سه‌فاز ترانسفورماتورهای جریان در دو طرف اولیه و ثانویه به دست می‌آید. در این الگوریتم فاصله زمانی ۱۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. بعد از یافتن ψ_μ طبق (۳۰)، i_μ و سپس طبق (۳۷)، (۴۱) و (۴۵) جریان‌های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان به دست می‌آیند. در این روابط i_{ps} همان جریان‌های اولیه ترانسفورماتور قدرت است. در شکل ۶، شکل موج شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور و در شکل‌های ۷ و ۸، جریان‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور قدرت بر اثر پدیده فوق اشباع نشان داده شده است. بر اساس شکل ۶ شار DC در هسته مغناطیسی ترانسفورماتور قدرت در مرحله اولیه فرایند به جای کاهش، افزایش یافته و پدیده فوق اشباع رخ می‌دهد. به عبارت دیگر زمانی که ترانسفورماتور قدرت با بار برق‌دار می‌شود، دامنه جریان هجومی در مرحله اولیه فرایند به جای کاهش، افزایش می‌یابد و در این شرایط، شار در ناحیه اشباع باقی می‌ماند و باعث وقوع پدیده فوق اشباع می‌شود. اما در صورتی که ترانسفورماتور بدون بار برق‌دار شود، بعد از برق‌دار شدن شار به ناحیه خطی باز می‌گردد و پدیده فوق اشباع رخ نمی‌دهد. در وضعیت فوق اشباع، نقاط بهره‌برداری به ناحیه اشباع سوق داده می‌شود و به ناحیه خطی برنمی‌گردد که در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۹ جریان دیفرانسیل (i_d) که از تفاضل جریان‌های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان سمت اولیه و سمت ثانویه به دست می‌آید، نشان داده شده است. شکل ۱۰ تغییرات دامنه مؤلفه اصلی i_d در شکل ۹ را نشان می‌دهد که با الگوریتم تبدیل فوریه گسسته ارزیابی شده است. در این شکل دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل بر حسب جریان نامی ثانویه ترانسفورماتورهای جریان (۵ آمپر) نرمالیزه شده است. شکل ۱۱ نسبت تغییر هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل را نشان می‌دهد که با الگوریتم تبدیل فوریه گسسته ارزیابی شده است. با توجه به شکل ۱۰ دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل هر سه‌فاز از ابتدای برق‌دار

۳- شبیه‌سازی پدیده فوق اشباع

فرض می‌شود هر سه فاز ترانسفورماتور قدرت باردار از سمت فشار قوی در لحظه $t=0$ بسته می‌شود. پارامترهای منبع و ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز به شرح زیر می‌باشند

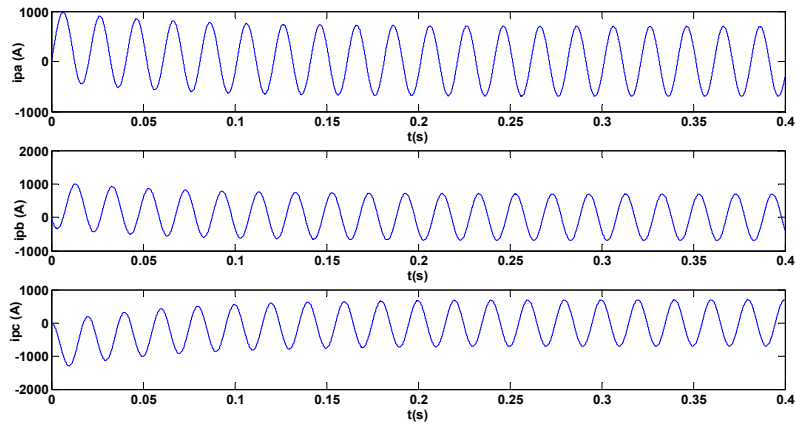
$$\begin{aligned}
 u_{pa} &= U_m \sin(\omega t + \theta) \\
 u_{pb} &= U_m \sin(\omega t + \theta - 120^\circ) \\
 u_{pc} &= U_m \sin(\omega t + \theta - 240^\circ) \\
 U_m &= 400 \text{ kV}, \quad \omega = 100\pi \text{ rad}, \quad \theta = 80^\circ \\
 k &= \frac{400}{23} \text{ kV}, \quad R_p = 0.9 \Omega \\
 L_{dp} &= 0.1019 \text{ H}, \quad R_s = 0.5 \Omega \\
 L_{ds} &= 0.2327 \text{ H}, \quad R_b = 5 \Omega, \quad L_b = 0.292 \text{ H} \\
 S &= 500 \text{ MVA}, \quad N_p = 610, \quad N_s = 352 \\
 \mathfrak{R}_d &= 250 \frac{\text{A.t}}{\text{Wb}}, \quad f_{.a} = 0.5 \text{ A.t}, \quad p_a = 2 \\
 k_{\tau a} &= 28 \frac{\text{Wb}}{\text{A.t}}, \quad k_{\tau a} = 0.995 \frac{\text{Wb}}{\text{A.t}} \\
 f_{.b} &= 0.2 \text{ A.t}, \quad p_b = 2, \quad k_{\tau b} = 45 \frac{\text{Wb}}{\text{A.t}} \\
 k_{\tau a} &= 0.9152 \frac{\text{Wb}}{\text{A.t}}, \quad f_{.c} = 0.5 \text{ A.t} \\
 p_c &= 2, \quad k_{\tau c} = 28 \frac{\text{Wb}}{\text{A.t}}, \quad k_{\tau c} = 0.9134 \frac{\text{Wb}}{\text{A.t}} \\
 \phi_a(\cdot) &= 1.5878e^{-\tau} \text{ wb}, \quad \phi_b(\cdot) = 4.7619e^{-\tau} \text{ wb} \\
 \phi_a(\cdot) &= -6.3518e^{-\tau} \text{ wb}
 \end{aligned}$$

پارامترها برای ترانسفورماتور جریان در سمت فشار قوی ترانسفورماتور

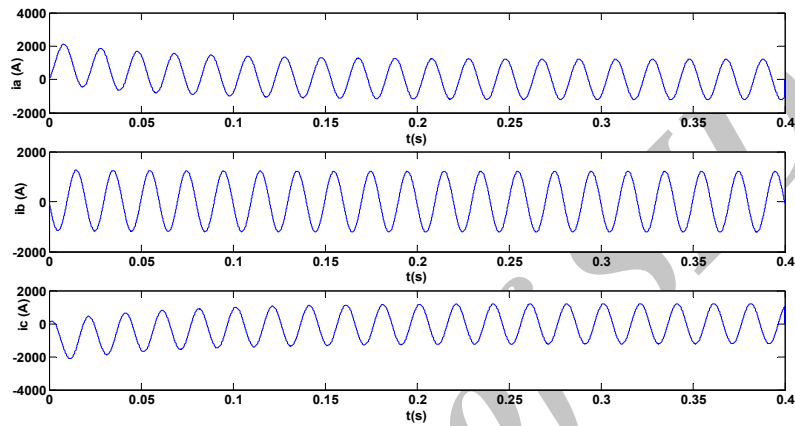
$$\begin{aligned}
 k &= \frac{400}{5}, \quad B_s = 1.8 \text{ T}, \quad L_s = 0.7 \text{ mH} \\
 A &= 3.472e^{-\tau} \text{ m}^\tau, \quad \psi_s = 0.75 \text{ (wb} \times \text{turns)} \\
 i_\mu &= 0.5 \text{ mA}, \quad R = 0.5 \Omega
 \end{aligned}$$

برای ترانسفورماتور جریان در سمت ثانویه ترانسفورماتور

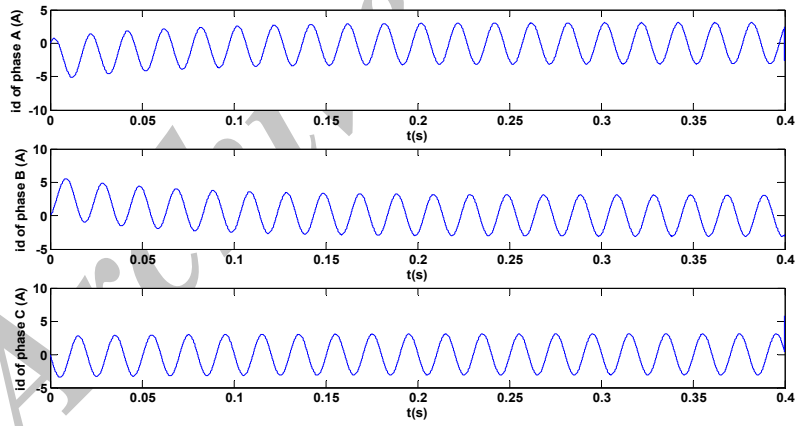
$$\begin{aligned}
 k &= \frac{1000}{5}, \quad B_s = 1.9 \text{ T}, \quad L_s = 0.7 \text{ mH} \\
 A &= 3.53e^{-\tau} \text{ m}^\tau, \quad \psi_s = 1.34 \text{ (wb} \times \text{turns)} \\
 i_\mu &= 0.3 \text{ mA}, \quad R = 0.15 \Omega
 \end{aligned}$$



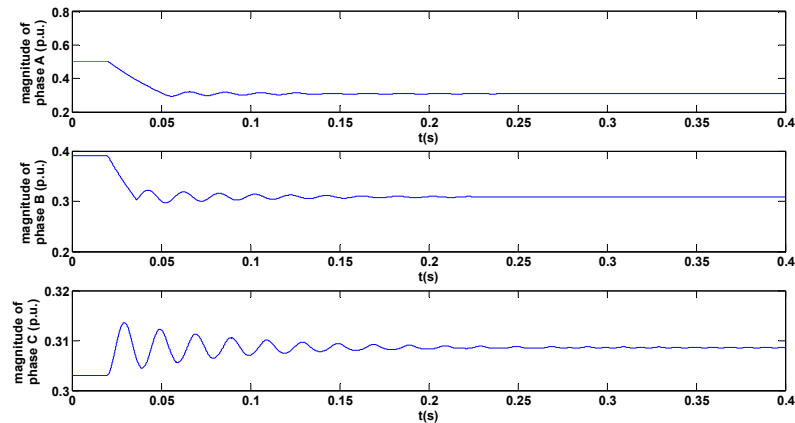
شکل ۷: شکل موج‌های جریان اولیه ترانسفورماتور.



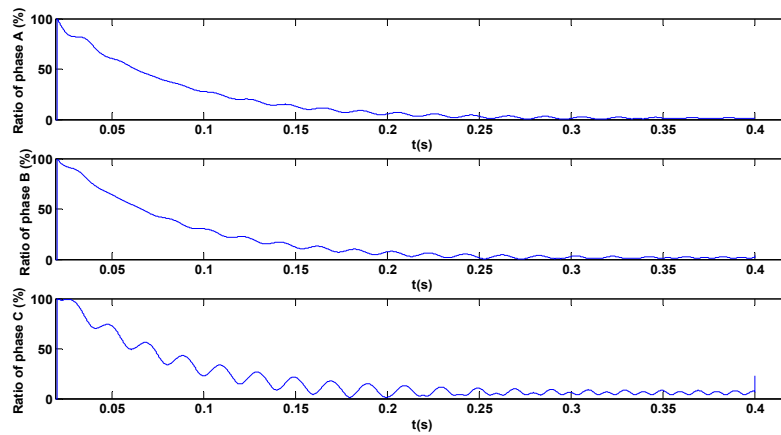
شکل ۸: شکل موج‌های جریان ثانویه ترانسفورماتور.



شکل ۹: شکل موج جریان دیفرانسیل.



شکل ۱۰: اندازه و بزرگی مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل مربوط به پدیده فوق اشباع.



شکل ۱۱: نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل مربوط به پدیده فوق اشباع.

جدول ۱: سناریوهای مختلف به ازای تغییر زاویه شروع هدایت.

$\theta(^{\circ})$	$\phi_a(^{\circ})(wb)$	$\phi_b(^{\circ})(wb)$	$\phi_c(^{\circ})(wb)$	$m(p.u.)$	$t_a(s)$	$t_{trip}(s)$
۰	۰٫۰۰۱۵۸۷	۰٫۰۰۴۷۶۱۹	-۰٫۰۰۶۳۵۱۸	۰٫۳۹۱۸	۰٫۱۴۱۶	۰٫۱۴۱۶
۲۰	۰٫۰۰۱۵۸۷	۰٫۰۰۴۷۶۱۹	-۰٫۰۰۶۳۵۱۸	۰٫۳۷۰۶	۰٫۱۳۹۸	۰٫۱۳۹۸
۴۰	۰٫۰۰۱۵۸۷	۰٫۰۰۴۷۶۱۹	-۰٫۰۰۶۳۵۱۸	۰٫۳۴۶۹	۰٫۱۳۷۱	۰٫۱۳۷۱
۶۰	۰٫۰۰۱۵۸۷	۰٫۰۰۴۷۶۱۹	-۰٫۰۰۶۳۵۱۸	۰٫۳۱۲۸	۰٫۱۳۵۹	۰٫۱۳۵۹
۸۰	۰٫۰۰۱۵۸۷	۰٫۰۰۴۷۶۱۹	-۰٫۰۰۶۳۵۱۸	۰٫۳۰۷۳	۰٫۱۳۴۴	۰٫۱۳۴۴

جدول ۲: سناریوهای مختلف به ازای تغییر شار باقیمانده.

$\phi_a(^{\circ})(wb)$	$\phi_b(^{\circ})(wb)$	$\phi_c(^{\circ})(wb)$	$\theta(^{\circ})$	$m(p.u.)$	$t_a(s)$	$t_{trip}(s)$
-۰٫۰۰۰۷۲	-۰٫۰۰۰۸۳	۰٫۰۰۱۵۵	۸۰	۰٫۲۹۸۱	۰٫۱۰۹۱	۰٫۱۰۹۱
-۰٫۰۰۰۹۲	-۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱۹۲	۸۰	۰٫۳۰۱۵	۰٫۱۱۴۱	۰٫۱۱۴۱
.	.	.	۸۰	۰٫۳۰۴۱	۰٫۱۲۸۲	۰٫۱۲۸۲
۰٫۰۰۱۳	۰٫۰۰۱۵	-۰٫۰۰۲۸	۸۰	۰٫۳۰۵۸	۰٫۱۳۰۶	۰٫۱۳۰۶
۰٫۰۰۱۵۸۷	۰٫۰۰۴۷۶۱۹	-۰٫۰۰۶۳۵۱۸	۸۰	۰٫۳۰۷۳	۰٫۱۳۴۴	۰٫۱۳۴۴

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دامنه پریونیت شده مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع در ترانسفورماتور قدرت نشان داده شده که با توجه به این شکل‌ها عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل تشریح شده است. این نتایج را می‌توان با نتایج [۳] تا [۵] مقایسه کرد. بنابراین، نتایج به دست آمده صحت مدل‌سازی پدیده فوق اشباع در ترانسفورماتور قدرت سه‌فاز باردار را نشان می‌دهد.

پدیده فوق اشباع یک مشکل خیلی بزرگ برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت ایجاد می‌کند. دانستن این که چرا و چه موقع ممکن است پدیده فوق اشباع اتفاق بیفتد ممکن است درک موارد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل را آسان‌تر کند. همچنین پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در اثر پدیده فوق اشباع به فاکتورهای متنوعی بستگی دارد که از مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد. در جدول ۱ و ۲ به ترتیب سناریوهای مختلفی به ازای تغییر زاویه شروع هدایت و شار باقیمانده برای بررسی پدیده فوق اشباع آورده شده است.

در جدول ۱ و ۲، m ، t_a و t_{trip} به ترتیب دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل بر حسب پریونیت هنگامی که نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک اصلی جریان دیفرانسیل به ۱۵ درصد می‌رسد، زمان رسیدن نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک اصلی جریان دیفرانسیل به ۱۵ درصد و زمان قطع حفاظت دیفرانسیل هستند. با توجه به جدول ۱، هر

کردن در بالای ۰٫۲۵ پریونیت می‌باشد و تقریباً بعد از ۶ سیکل به بالای مقدار ۰٫۲۵ پریونیت ثابت باقی می‌ماند. همچنین با توجه به شکل ۱۱ نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه فاز A در زمان ۰٫۱۳۴۴ ثانیه، فاز B در زمان ۰٫۱۴۶۳ ثانیه و فاز C در زمان ۰٫۱۵۳۷ ثانیه به زیر ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱، اگر حفاظت دیفرانسیل به طور هم‌زمان ۰٫۲۵ پریونیت را به عنوان آستانه عملکرد برای دامنه حالت ماندگار مؤلفه اصلی و ۱۵ درصد به عنوان نسبت محدودیت هارمونیک مرتبه دوم استفاده کند عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در زمان ۰٫۱۳۴۴ ثانیه رخ می‌دهد.

برای اثبات صحت نتایج به دست آمده، در شکل ۶ شار DC مغناطیسی ترانسفورماتور قدرت در شرایط فوق اشباع نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در صورت وقوع پدیده فوق اشباع شار در ناحیه اشباع باقی می‌ماند و به ناحیه خطی باز نمی‌گردد که این نتیجه را می‌توان با نتایج [۳] تا [۵] مقایسه کرد. همچنین در [۳] تا [۵] دو معیار برای عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع تعریف شده است. یکی از معیارها، دامنه پریونیت شده مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل و دیگری نسبت هارمونیک مرتبه دوم به هارمونیک پایه جریان دیفرانسیل می‌باشد. در صورتی که به طور هم‌زمان دامنه مؤلفه اصلی جریان دیفرانسیل از ۰٫۲۵ پریونیت بزرگ‌تر و نسبت هارمونیک مرتبه دوم به پایه جریان دیفرانسیل از ۱۵ درصد کمتر شود حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع عملکرد ناخواسته خواهد داشت. در این مقاله در

- IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1265-1272, Apr. 2005.
- [4] H. Weng, X. Lin, and P. Liu, "Studies on the operation behavior of differential protection during a loaded transformer energization," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1386-1391, Jul. 2007.
- [5] A. Wiszniewski, W. Rebizant, D. Bejmert, and L. Schiel, "Ultra saturation phenomenon in power transformers-myths and reality," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1327-1334, Jul. 2008.
- [6] A. Wiszniewski, H. Ungrad, and W. Winkler, *Protection Techniques in Electrical Energy Systems*, New York: Marcel Dekker, 1995.
- [7] Numerical Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors and Mini Bus Bars, SIEMENS AG, 2006, 7UT613/63x V.4.06 Instruction Manual, Order. C53000-G1176-C160-2.
- [8] J. Pedra, L. Saniz, F. Corcoles, R. Lopez, and M. Salichs, "PSPICE computer model of a nonlinear three-phase three-legged transformer," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 200-207, Jan. 2004.
- [9] M. Naidu and G. W. Swift, "Dynamic analysis of a current transformer during faults," *Electric Power System Research*, vol. 11, no. 3, pp. 225-231, Dec. 1986.

بهرام نوشاد تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سالهای ۱۳۸۱ و ۱۳۸۳ از دانشگاه شیراز و تربیت مدرس تهران و هم-اکنون دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت دانشگاه شهید چمران اهواز می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: حفاظت، بهره برداری از سیستم های قدرت و الکترونیک قدرت.

مرتضی رزاز در سال های ۱۳۵۶ و ۱۳۵۸ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تگزاس دریافت نمود. در سال ۱۳۷۲ دکتری مهندسی برق را از دانشگاه شاروب انگلستان دریافت نمود. دکتر رزاز از سال ۱۳۵۹ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید چمران اهواز مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه نام برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده های نو در حفاظت، ماشین های الکتریکی و الکترونیک قدرت می باشد.

سید قدرت اله سیف السادات در سال های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۱ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه علم و صنعت ایران و فردوسی مشهد دریافت نمود. در سال ۱۳۸۵ دکتری مهندسی برق را از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. دکتر سیف السادات از سال ۱۳۷۲ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید چمران اهواز مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه نام برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده های نو در حفاظت، ماشین های الکتریکی و الکترونیک قدرت می باشد.

چه زاویه شروع هدایت بزرگ تر می شود زمان قطع حفاظت دیفرانسیل کاهش می یابد. همچنین هر چه شار باقیمانده در ترانسفورماتور بیشتر باشد زمان قطع حفاظت دیفرانسیل بیشتر می شود که در جدول ۲ نشان داده شده است.

یکی از عوامل دیگری که می تواند باعث تغییر زمان تریپ ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع شود، ضریب قدرت بار است. هرچه مقاومت بار کمتر و اندوکتانس بار بیشتر شود توان اکتیو بار افزایش و توان راکتیو بار کاهش می یابد که در این حالت ها زمان تریپ ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع افزایش می یابد. اما در صورتی که مقاومت بار افزایش و اندوکتانس بار کاهش یابد توان اکتیو بار کاهش و توان راکتیو بار افزایش یافته و در نتیجه زمان تریپ ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع کاهش می یابد. بنابراین هرچه ضریب توان بار به سمت یک نزدیک تر باشد زمان عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل بر اثر پدیده فوق اشباع افزایش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله پدیده فوق اشباع در طول برق دار کردن ترانسفورماتور قدرت سه فاز باردار بررسی شد و تأثیر آن بر عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل مطالعه گردید. برای مدل کردن پدیده فوق اشباع ویژگی هایی از قبیل غیر خطی بودن شاخه مغناطیس شونده، اثر اشباع ترانسفورماتورهای جریان و مختلط بودن بار در نظر گرفته شد. پیشامد عملکرد ناخواسته حفاظت دیفرانسیل در اثر پدیده فوق اشباع به فاکتورهای متنوعی بستگی دارد که از مهم ترین این پارامترها می توان به شار باقیمانده و زاویه شروع هدایت اشاره کرد که در این مقاله به ازای سناریوهای مختلف بررسی شد. نتایج نشان می دهند که پدیده فوق اشباع یک پدیده ممکن و احتمالی می باشد. بنابراین تشخیص پدیده فوق اشباع گامی مهم به سوی عملکرد صحیح حفاظت دیفرانسیل است که می توان حالت هایی غیر معمول که در حال حاضر در تجهیزات و رله به کار برده می شوند را بهتر کنترل کرد.

مراجع

- [1] C. A. Mathews, "An improved transformer differential relay," *AIEE Trans.*, vol. 73, no. 7, pp. 645-650, Jun. 1954.
- [2] T. R. Specht, "Transformer magnetizing inrush current," *AIEE Trans.*, vol. 70, no. 3, pp. 323-328, 1951.
- [3] X. Lin and P. Liu, "The ultra-saturation phenomenon of loaded transformer energization and its impacts on differential protection,"