



انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران
شاخه ي تهران



دانشگاه صنعتي اميركبير
قطب علمي قدرت

پياده سازي محاسبات الكتريكي ترانسفورمرهاي جريان فشار قوي به صورت مكانيزه

دكتر مهدي وكيان

بامداد فلاحتي

دانشگاه صنعتي شريف ، دانشكده مهندسي برق

كشور: ايران

واژه هاي كليدي: ترانسفورمرهاي جرياني، رله هاي حفاظتي، پستهاي فشار قوي

مقدمه

محاسبات الكتريكي ترانسفور هاي جرياني موسوم به محاسبات CT يكي از مدارك طراحي پست هاي فشار قوي است كه براي تايد هماهنگي CT با رله مي باشد . با توجه به تنوع سازنده ، تفاوت ساختمان هسته هاي CT ، متعدد بودن پارامترهاي تاثير گذار بر طراحي ، تهيه اين مدرک کاری زمان بر و همراه با اشتباهات محاسباتي متعدد می باشد.

با عنايت به نياز روز افزون شركت هاي پيمانكار در وادي رقابت ، افزودن دقت يعني حذف خطاهای انسانی که گاه موجب اتلاف زمان های جبران ناپذیری برای هم پیمانکار و هم مشاور می شود و البته سرعت بخشیدن به روال زمان بر کار و افزایش سطح کیفی مدارک که موجبات هماهنگی بامشاورین را فراهم می آورد و خواسته های آنها را پاسخگو باشد، الزام به استفاده از نرم افزار های کارآمد در تهيه مكانيزه مدارك به خوبي احساس می شود.

نرم افزار هايي كه توانايي و اعتبار شركت هاي پيمانكاري را براي شركت در مناقصات بزرگتر و حتي برون مرزي به طور چشمگيري افزايش می دهد.

نرم افزار مربوطه بايد بتواند اين نياز هاي پيمانكاران ومشاوران را برآورده سازد:

- هماهنگي نرم افزار با استاندارد هاي بين المللي
- توانايي بر آورده ساختن نياز مشاوران
- به روز بودن اطلاعات نرم افزار
- قابليت حذف خطاهای انسانی
- تهيه خروجی به صورت اتوماتيك و حذف نقاط زمان بر کار

چکیده

محاسبات الكتريكي ترانسفورمرهاي جريان برای تامین هماهنگي میان مشخصات CT و ادوات حفاظتي و اندازه گيري متصل به آن می باشد.

با توجه به ساختار مغناطيسي هسته ترانسفورمرهاي جريان ، اشباع در هسته امري اجتناب نا پذير می باشد . در کاربردهای حفاظتي ، هدف حفظ هسته CT در ناحیه خطی در تمامی محدوده رژیم محتمل کار آن و از جمله در وقوع خطاها می باشد .

تعدد رله های حفاظتي و سازندگان مختلف منجر به شكل گيري روشهاي محاسبه متعددی برای ارزیابی مشخصات اين ترانسفورمرهاي جريان شده است . لذا نياز به وجود دستور العملی است كه برای تمام كلاسهای حفاظتي CT و با توجه به رله هاي موجود ، روشی يكسان را پياده سازي كند می باشد .

با توجه به اينكه برای كلاسهای حفاظتي می توان محدوده آستانه اشباع Knee Point Voltage را محاسبه كرد . كافي است برای هر رله شرایط را به صورت ولتاژی بیان نمود. همچنین با تعریف متغیر های پیش فرض ، این الزامات شكل استاندارد ی به خود گرفته كه شناسایی،تحلیل و مقدار دهی آنها توسط نرم افزار امكان پذیر می باشد. بر پایه این ایده نرم افزاری تهيه شده است كه با پشتوانه يك بانك اطلاعاتی و سیستم هوشمند توانایی تحلیل ، محاسبه و همچنین ذخيره مشخصات ارزیابی شده برای ترانسفورمر جريان را دارا می باشد .

دراین مقاله راه کارهای يكسان سازي كه منجر به مكانيزه شدن محاسبات الكتريكي ترانسفورمر جريان فشار قوي می شود ، و همچنین چند نمونه محاسبه این مشخصات ارائه شده است.



بنابراین با توجه به نکات فوق در می یابیم که سیم پیچ های ترانسفورماتورهای جریان به دو منظور استفاده می گردند.
الف- به منظور اندازه گیری : که دقت را در جریانی حدود جریان نامی می خواهد.
ب- به منظور حفاظتی : که دقتی در حدود جریان نامی یا چندین برابر آن را ایجاب می کند.

۱-۱- Core های اندازه گیری

همانطور که گفته شد محاسبات هماهنگی در Core های اندازه گیری به گونه ای صورت می گیرد که در هنگام خطا جریان اتصال کوتاه منتقل شده به طرف ثانویه قابل تحمل برای تجهیزات متصل باشد. بدین منظور برای کاهش جریان ثانویه از هسته های با اشباع پایین استفاده می شود. هرچه هسته CT زودتر اشباع شود جریانی که در مدار رله و CT جاری می شود کمتر می گردد. اگر این جریان را SCC بنامیم، معیاری برای مقایسه با تحمل تجهیزات در مقابل اتصال کوتاه SCW می باشد.

$$SCC < SCW \quad (1)$$

جریان اتصال کوتاه ثانویه به صورت زیر محاسبه می شود.

$$SCC = \frac{V_k}{R_{Total}} \times 1.1 \quad (2)$$

که $V_k \times 1.1$ مقدار ماکزیمم ولتاژی است که در طرف ثانویه CT می افتد و R_{Total} کل مقاومتی است که در مدار ثانویه قرار دارد که مقدار آن عبارت است:

$$R_{Total} = R_{CT} + R_p + R_b \quad (3)$$

که در آن R_b مقاومت تجهیز اندازه گیری و R_p مقاومت کابل مسیر و R_{CT} مقاومت هسته CT می باشد.
همانطوری که مشاهده می شود هرچه V_k کمتر و R_{Total} بیشتر باشد جریان اتصال کوتاه ثانویه کاهش می یابد.

۱-۲- Core های حفاظتی

با توجه به اینکه رله های حفاظتی جریان خطا را اندازه می گیرند (بر خلاف تجهیزات اندازه گیری که جریان نامی را اندازه می گیرند) باید دقت خود را در جریان خطا حفظ نمایند.

- انعطاف پذیری نرم افزار در حد امکان
برای تهیه این نرم افزار ابتدا باید دستورالعملی فراگیر و یکسان تهیه کرد تا برای تمام حالت ها قابل استفاده و پیاده سازی باشد.
در این مقاله به تشریح روشی که برای مکانیزه کردن این مدرک صورت گرفته است پرداخته شده است. در واقع این دستور العمل برای ارتباط میان استاندارد ANSI و BS با استاندارد IEC می باشد.
در ادامه نرم افزاری که بر پایه این روش طراحی شده است معرفی شده است.

۱- مشخصات الکتریکی ترانسفورمرهای جریانی

در یک پست فشار قوی برای قرائت جریان خطوط و تجهیزات فشار قوی از CT استفاده می شود. ترانسفورماتورهای جریان از دو سیم پیچ اولیه و ثانویه تشکیل شده است که جریان واقعی در پست از اولیه عبور نموده و در اثر عبور این جریان و متناسب با آن جریان کمی (در حدود ۱ تا چند آمپر) به وجود می آید. به طور کلی ترانسفورماتورهای جریان نقش کاهنده جریان را دارند. یکی از مهمترین موارد در ساختمان یک ترانسفورماتور جریان اختلاف ولتاژ خیلی زیاد بین اولیه و ثانویه می باشد. ترانسفورماتورهای جریان به منظور استفاده در سیستم های کنترل و اندازه گیری و همچنین سیستم حفاظت می باشند. هسته سیم پیچ ثانویه برای سیستم کنترل و اندازه گیری با سیستم حفاظت از لحاظ اشباع متفاوت می باشد.

در سیستم کنترل و اندازه گیری معمولاً جریان نامی مطرح بوده و در موقع ایجاد جریان های زیاد ناشی از اتصال کوتاه می بایست سعی شود که به دستگاه های اندازه گیری صدمه وارد نشود. لذا لازم است که هسته ثانویه در جریان های نامی به اشباع برسد. لیکن در سیستم های حفاظت که معمولاً در مواقع ایجاد اتصال کوتاه عمل می نماید می بایست سعی شود که مقادیر جریان های اتصال کوتاه که چندین برابر جریان نامی می باشد تا حد ممکن بدقت در ثانویه بوجود آید. بنابراین هسته سیم پیچ های ثانویه مربوط به حفاظت لازم است در جریان های خیلی بالا نیز اشباع نشود. با توجه به مطالب فوق معمولاً ترانسفورماتورهای جریان طوری ساخته می شوند که دارای چند سیم پیچ بوده که هر یک می توانند حفاظت یا کنترل باشند.

در حال حاضر حداکثر تعداد ثانویه در ترانسفورماتورهای جریان ۶ Core می باشد که معمولاً دو Core مربوط به اندازه گیری و بقیه به منظور هدف های حفاظتی به کار می روند.



استانداردی که دقت را با فرمت کلاس بیان می کند استاندارد BS (British Standard) می باشد.
به صورت تقریبی ولتاژ ثانوی کلاس 5Px ، ۱،۳ برابر ولتاژ ثانوی کلاس X می باشد.

۱-۲-۳- کلاس TPY

Core های با کلاس TPY عموماً دارای اشباع بسیار بالایی می باشند و دارای دقت کمتری به نسبت Core های کلاس X می باشند. علت این امر وجود یک شکاف هوایی در هسته آن ها می باشد. پارامترهای زیادی در محاسبه ولتاژ ثانوی این کلاس نقش دارند که بحث آن در این مقاله نمی گنجد. فقط به ذکر این نکته بسنده می کنیم که ولتاژ ثانو از فرمول:

$$V_{knee} = I_2 \times K_{ssc} \times K_{td} \times (R_b + R_{CT}) \quad (5)$$

محاسبه می شود که در آن :

I_2 جریان ثانویه هسته

R_b مقدار Burden مجاز قابل وصل به ثانویه CT بر حسب اهم

R_{CT} مقاومت اهمی سیم پیچی هسته

K_{td} ضریب تاثیر پارامترهای شبکه و نحوه بازبست کلید می باشد.

K_{ssc} نسبت جریان خطا به جریان اولیه CT

توضیحات مربوط به نحوه محاسبه پارامتر های کلاس TPY در

استاندارد IEC(44-6) بیان شده است.

(شکل ۲)

۲- رله های حفاظتی

رله های حفاظتی به عنوان مهمترین قسمت از بخش حفاظت

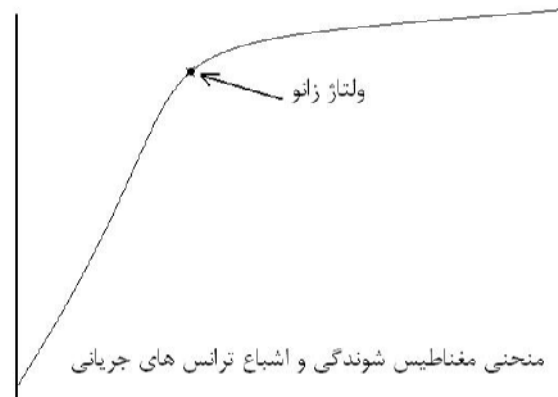
پست وظیفه شناسایی و حذف خطا ها را دارند. عملکرد رله ها با توجه به ورودی جریانی و ولتاژی از ترانسفورمرهای اندازه گیری CT, CVT می باشد.

حفاظت های گوناگونی برای پست در نظر گرفته می شود که بعضی از

آنها عبارتند از :

Distance- ۱

به طور متداول ۳ نوع هسته برای استفاده حفاظتی وجود دارد که هر کدام با توجه به مشخصاتی که دارند دارای روش تحلیل خاص خود می باشند.



(شکل ۱)

۱-۲-۱- کلاس P

Core های با کلاس P با استاندارد IEC برای حفاظت های

معمولی از جمله OC به کار می روند و نحوه بیان آن به صورت aP_b می باشد که a بیان کننده درصد خطا در b برابر جریان نامی (Accuracy limit factor) می باشد.

روشی که برای بیان هماهنگی میان Core و رله استفاده می شود روش $k'alf$ نام دارد که در آن $k'alf$ مقدار حقیقی Accuracy limit factor می باشد که با توجه به مقاومت مسیر و Burden

رله و مقاومت داخلی CT و Burden

این مقدار از رابطه زیر محاسبه می شود.

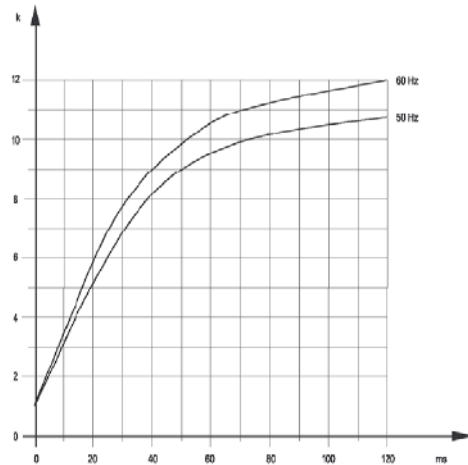
$$k'alf = kalf \times \frac{P_i + P_N}{P_i + P_b} \quad (4)$$

۱-۲-۲- کلاس X

Core های با کلاس X تحت استاندارد BS (British

Standard) ساخته شده اند و حد اشباع آن با یک عدد (مثلاً ۷۵۰۰

مشخص شده است از نظر ساختمان هسته کلاس X تفاوتی با کلاس P ندارد. بلکه فقط نحوه بیان اشباع تغییر کرده است. دقت این کلاس ها بسیار بالا می باشد و برای حفاظت هایی استفاده می شوند که با تفاضل یا مجموع جریان ها سر و کار دارند. (مانند حفاظت باسبار یا دیفرانسیل ترانس)



(شکل ۳)

۳- وسایل اندازه گیری

وسایل اندازه گیری ادواتی هستند که از جریان CT به گونه ای برای محاسبات جریان ، انرژی اکتیو و راکتیو و دیگر پارامترها استفاده می نمایند.
بعضی از این تجهیزات عبارتند از :

آمپر متر، واتمتر، وارمتر ، کنتور، F.R و P.F meter.

در لحظه وقوع خطا جریان خطایی که به طرف ثانویه منتقل می شود برای تجهیز بسیار خطرناک است و حتی امکان آسیب دیدن آن نیز می باشد. لذا در هر وسیله اندازه گیری پارامتری به نام SCW (Short circuit withstanding) معرفی می شود که این پارامتر بیانگر ماکزیمم جریانی است که تجهیز می تواند در یک ثانیه تحمل کند. با بانک اطلاعاتی که برای تمام تجهیزات اندازه گیری تهیه شده است و در آن اطلاعات مورد نیاز برای تجهیز از جمله Burden و SCW وارد شده است امکان محاسبات مکانیزه فراهم می شود.

۴- مکانیزه کردن محاسبات

۴-۱- استاندارد نامگذاری متغیرها

برای شروع یکسان سازی در ابتدا باید برای متغیرهای تاثیر گذار در طراحی نام های استاندارد و یکسانی انتخاب کرد تا سیستم مکانیزاسیون قابلیت تشخیص متغیرها را داشته باشد و بتواند برای آن ها مقدار مورد نظر را تشخیص دهد. برای تعریف کردن CT-Req باید به موارد زیر توجه کرد. برای نرم افزار برای اینکه بتواند متغیرهای

۲- OC

۳- Differential

در هر حفاظت ، رله از CT جریان مورد نیاز برای تحلیل را گرفته سپس با توجه به مقدار آن تصمیم مناسب را برای Trip اتخاذ می نماید.

جریان خطایی که در طرف ثانویه CT جاری می شود ولتاژی را در سر Core می اندازد که اگر از ولتاژ ثانوی CT بیشتر باشد باعث اشباع CT می شود و جریانی که در طرف ثانویه CT اندازه گیری می شود دیگر با جریان اولیه متناسب نمی باشد . به عبارت دیگر خطای اندازه گیری CT از حد مجاز خارج می شود. لذا سازندگان برای تامین دقت برای ماکزیمم جریان خطا شرایط مورد نیاز را به نام CT-Req (CT Requirement) ارائه می دهند . این CT-Req برای کلاسهایی که دارای فرمت ولتاژی می باشند به صورت شرط V_{Req} ارائه شده است. به عنوان مثال CT-Req استاندارد برای رله های OC به صورت

$$V_r = \frac{I_F}{I_1} \times I_2 \times (R_{CT} + R_p + R_b) \quad (6)$$

بیان می شود که V_r ولتاژ ثانویه CT در هنگام رویداد خطا می باشد. برای بسیاری از رله ها باتوجه به سازنده و کاربرد آن بیش از یک - CT Req ارائه می شود که باید بدترین مقدار آن برای ولتاژ ثانویه انتخاب شود.

همچنین بسیاری از رله ها از پارامترهای شبکه به عنوان پارامترهای - CT Req استفاده می کنند که باتوجه به ثابت زمانی شبکه تعیین می شود. به عنوان مثال برای رله REL511 که یک رله حفاظت دیستانس می باشد دو CT-Req تعریف شده است که عبارتند از :

$$V_r(1) = \frac{I_F}{I_1} \times I_2 \times a \times (R_B + R_P + R_{CT}) \quad (7)$$

$$V_r(2) = \frac{I_{z1}}{I_1} \times I_2 \times k \times (R_B + R_P + R_{CT}) \quad (8)$$

که پارامترهای a و k با توجه ثابت زمانی شبکه از روی نمودار مشخص می شود. در شکل زیر رابطه k با ثابت زمانی شبکه بیان شده است.



دو رابطه بالا معادل هستند و فقط طرفین و وسطین شده اند. البته هر سازنده رله برای خود از اصطلاحات خود استفاده کرده است که در اصل موضوع تفاوتی ایجاد نمی کند.

در رابطه بالا P_N معادل BURDEN کلاس P رله می باشد. P_E برابر با

$$P_E = I_2^2 \times R_{ct} \quad (11)$$

و P_B برابر است با

$$P_B = I_2^2 \times (R_b + R_p) \quad (12)$$

(بردن مسیر به همراه بردن رله های درمسیر). البته موارد فوق به صراحت در کاتالوگ سازنده ذکر شده است.

با طرفین وسطین رابطه اول و اینکه ولتاژ ثانویه برای کلاس P از فرمول

$$V_{knee(CT)} = K_{alf} \times I_2 \times \left(\frac{R_{ct} + V A_{class(p)}}{I_2^2} \right) \quad (13)$$

محاسبه می شود به این رابطه می رسمیم که

$$V_{knee(CT)} > K'_{ALF} \times I_2 \times (R_B + R_P + R_{CT}) \quad (14)$$

برای یکسان سازی میان استاندارد BS و IEC می توان رابطه فوق را در $\frac{1}{1.3}$ ضرب کرد.

۲- رابطه دوم با وجود اینکه برای هر رله در هر شرایطی میتواند متفاوت باشد ، ولی دارای این وجه مشترک است که K'_{ALF} را بر حسب متغیر های دیگر بیان کرده است .

لذا فرمولی که برای **CT-Req** بیان شده است برابر است با

$$V_{RISE(RELAY)} = K'_{ALF} \times I_2 \times (R_B + R_P + R_{CT}) \quad (15)$$

به عنوان مثال برای رله های ABB داریم: (n همان Kalf می باشد)

$$n' = n \cdot \frac{P_N + P_E}{P_B + P_E}$$

$$n' > \frac{I_{KS \max}}{5 * I_{N \text{ prim}}}$$

(شکل ۴)

فرمول های CT-Req را به صورت پیش فرض تشخیص دهد و مقدار گذاری نماید باید از استاندارد های نام گذاری متغیر ها استفاده شود. برای نرم افزار متغیر های زیر از پیش تعریف شده می باشند:

I ₁	جریان اولیه CT	A
I ₂	جریان ثانویه CT	A
I _F	جریان خطای اتصال کوتاه اولیه	A
I _{ff}	جریان خطای TROUGH FAULT	A
I _{z1}	جریان خطای ZONE اول برای رله های DISTANCE	A
R _p	مجموع مقاومت مسیر بر اساس کابل استفاده شده	Ω
R _b	مجموع BURDEN رله های در مسیر	Ω
R _{ct}	مقاومت CORE که رله به آن متصل است	Ω

(جدول ۱)

۴-۲- روش یکسان سازی CT_Req کلاس های مختلف

برای بعضی از رله ها (از جمله رله های زمینس و یا غیره) از روش معادل K'_{ALF} استفاده میشود. در این روش صرفا برای کلاس های P معادل سازی شده است. البته در کاتالوگ ها این مطلب ذکر شده است. توجه به این امر مهم است که K_{ALF} و CT-BURDEN صرفا برای CORE های کلاس P تعریف شده می باشند. برای کلاس های X و TYPY عناوین K_{ALF} و CT-BURDEN مفهوم ندارند.

رله هایی که برای بیان CT-Req به جای ولتاژ ثانویه از روش K'_{ALF} استفاده می کنند ، باید توسط مهندس این فرمول به فرمول معادل ولتاژ ثانویه تبدیل شود.

البته این تبدیل با یک سری تبدیلات ریاضی صورت می گیرد و در زیر بیان شده و برای مثال چندین فرمول از رله های مختلف بیان شده اند. رابطه K'_{ALF} از دو رابطه تشکیل شده است:

۱- رابطه اول رابطه ای ثابت است که رابطه میان K_{ALF} و K'_{ALF} را بیان می کند و به صورت زیر می باشد:

$$K_{ALF} \geq K'_{ALF} \times \frac{P_B + P_E}{P_N + P_E} \quad (9)$$

یا

$$K'_{ALF} \leq K_{ALF} \times \frac{P_N + P_E}{P_B + P_E} \quad (10)$$



انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران
شاخه ی تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
قطب علمی قدرت

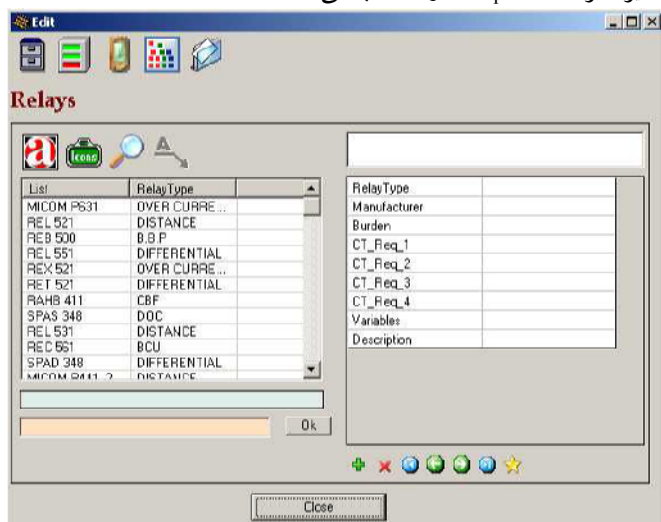
در راستای مکانیزه کردن محاسبات هماهنگی

ترانسفورمرهای جریانی، نرم افزاری با معیار های بالای صنعتی تهیه شده است که این نرم افزار نقش به سزایی در محاسبات ترانسفورمرهای جریانی و حذف خطاهای انسانی داشته است و هم اکنون در شرکت های متعدد و معتبر پیمانکاری مورد استفاده قرار می گیرد . نرم افزار ذکر شده توانسته است در برآورده ساختن خواسته های پیمانکاران موفق باشد. این نرم افزار ویژگی های زیر را دارا می باشد.

- قابلیت محاسبه کلاس های P,X,TPY,M
- توانایی محاسبه در تمام TAP ها
- بانک اطلاعاتی CT-Req اغلب رله ها
- قابلیت آرشیو کردن CT های استاندارد
- تولید خروجی با اطلاعات کامل به صورت فایل EXCEL

- سیستم هوشمند تشخیص خطاهای انسانی و محاسباتی
- قابلیت نرم افزار های استاندارد WINDOWS در کار با فایل (NEW, OPEN, SAVE)

اساس محاسبات نرم افزار بر مبنای ولتاژ زانو می باشد و برای هر Core حفاظتی ابتدا ولتاژ زانوی Core را محاسبه می کند . سپس با توجه به ادواتی که به آن Core متصل می باشند ، و با پشتوانه بانک اطلاعاتی که در نرم افزار CT -Req و Burden هر رله را ذخیره کرده است، V_{req} را محاسبه می کند.



(شکل ۶)

نرم افزار به سیستم Formula-Analyzer مجهز می باشد که وظیفه آن تحلیل فرمول هایی است که به صورت Text در نرم افزار وارد شده است .

رابطه اول به رابطه K'_{ALF} مشهور می باشد.

در رابطه بالا

$$K'_{ALF} = \frac{I_F}{5 \times I_1} \quad (16)$$

با جایگذاری در رابطه بالا به رابطه زیر می رسیم.

$$V_{rise(relay)} = I_F \times \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \times 0.2 \times (R_b + R_{ct} + R_p) \quad (17)$$

یا برای رله های زمینس داریم:

$$K_{ALF} \geq \frac{R_{BC} + R_i}{R_{BN} + R_i} \cdot K^*_{ALF}$$

K_{ALF} : Rated c.t. accuracy limiting factor
 K^*_{ALF} : Effective c.t. accuracy limiting factor
 R_{BN} : Rated burden resistance
 R_{BC} : Connected burden
 R_i : Internal c.t. burden (resistance of the c.t. secondary winding)

with:

$$K^*_{ALF} \geq K_{OF} \cdot \frac{I_{sc,max.}}{I_N}$$

$I_{sc,max.}$ = Maximum short-circuit current
 I_N = Rated primary c.t. current
 K_{OF} = Overdimensioning factor

(شکل ۵)

همانطور که ذکر شده است :

$$K'_{ALF} = \frac{R_{BN} + R_i}{R_{BC} + R_i} \times K_{ALF} \quad (18)$$

تنها تفاوت ظاهری که با رابطه رله ABB دارد از I_2^2 در صورت و

مخرج فاکتور گرفته و ساده شده است. یعنی :

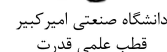
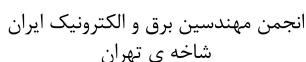
در رابطه بالا $P_{BN} = R_{BN} \times I_2^2$ معادل BURDEN کلاس P رله می باشد. $P_E = I_2^2 \times R_i$ برابر با (در متن بالا ذکر شده است Resistant of the CT secondary winding)

و P_{BN} برابر است با:

$$P_{BN} = I_2^2 \times (R_b + R_p) \quad (19)$$

(Connected burden.)

۵-نرم افزار تهیه شده



(شکل ۹)