

Основы построения релейной защиты на герконах

КЛЕЦЕЛЬ М.Я.

Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова

Казахстан

asbizh@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Защиты, герконы, токопроводы фаз, индукция, чувствительность.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

На международных конференциях по большим энергетическим системам (СИГРЭ) неоднократно отмечалось, например в [1,2], что одной из актуальных задач электроэнергетики является разработка релейной защиты (РЗ), не использующей трансформаторы тока (ТА). Задача стала еще более актуальной в связи с широким внедрением микропроцессорных защит. Дело в том, что надежность их срабатывания и несрабатывания в ряде случаев оказалось недостаточной, а чтобы добиться максимального эффекта в ее повышении необходимо, как известно [3], использовать мажорирование. При этом все три дублирующие друг друга защиты и преобразователи тока должны иметь разные принципы действия. В данной работе излагаются основы построения одной из возможных резервных систем РЗ, предназначенных для одновременного дублирования и традиционных защит и ТА. Для построения нами [4-9] выбраны магнитоуправляемые контакты (МК) - герконы, поскольку они не только нашли широкое распространение в технике [10], но и в сравнении с другими магниточувствительными преобразователями обладают весьма важными для РЗ преимуществами: не требуют усилителей для передачи сигнала, сама передача осуществляется по цепям управления, а не по измерительным, не нуждаются в устройствах компенсации влияния температуры и могут одновременно выполнять функции аналого-дискретного преобразователя, измерительного преобразователя и измерительного органа защиты. Мы используем выпускаемые в России симметричные язычковые МК с длиной баллона, как минимум, в 10 раз меньшей допустимого по технике безопасности расстояния от МК до токоведущих шин электроустановки (ЭУ). Как показали эксперименты [4,7,9,11], это позволяет применять закон Био-Савара-Лапласа для определения с точностью 3-6% индукции $B_{пр}$ магнитного поля (МП), созданного током в шине, в точке, где будет расположен рабочий зазор МК, при направлении вектора $B_{пр}$ вдоль предполагаемого размещения его продольной оси. В дальнейшем мы ограничимся словом «индукция», имея, однако, все сказанное в виду.

2 СВОЙСТВА МК В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

2.1 Чувствительность и возможная область использования.

Чувствительность МК определяется магнитодвижущей силой $F_{ср}$, необходимой для его срабатывания (переключения контактов). $F_{ср}$ измеряется в катушке индуктивности (КИ) с длиной l_K , радиусом r_K и числом w_K витков, причем $l_K \gg r_K$ и $l_K > l_\delta$ (l_δ - длина его баллона). МК помещается в центр КИ, а их продольные оси совмещаются. Тогда $F_{ср} = I_K \cdot w_K$, где I_K - ток в КИ в момент срабатывания. Для срабатывания МК, помещенного вблизи шин ЭУ, нужна точно такая же сила. Поэтому, если МК размещен на безопасном расстоянии h , например от фазы В (рис.1), в плоскости ее поперечного сечения под углом γ к плоскости параллельной шинам, и $x=0$ (рис.1), то (без учета влияния других фаз) в соответствии со сказанным и с законом Био-Савара-Лапласа

$$B_{ср} = \mu_0 I_{ср} \cos \gamma / 2\pi h = \mu_0 w_K I_K / l_K = \mu_0 F_{ср} / l_K = \mu_0 H_{ср}, \quad (1)$$

где I_{CP} , B_{CP} и H_{CP} – минимальные значения тока в токопроводе, индукции и напряженности МП, при которых МК срабатывает; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Из (1), зная F_{CP} (и I_K), измеренную в КИ, легко находится ток I_{CP} в шинах ЭУ. Погрешности определения I_{CP} не превышают 6% (с учетом неточностей крепления МК в намеченную точку) [7]. Но так можно определить I_{CP} только в ЭУ постоянного и однофазного переменного тока. В трехфазных ЭУ токи срабатывания зависят от вида короткого замыкания (КЗ). Здесь на МК, расположенный на расстояниях l_A , l_B и l_C от фаз, действует МП с

$$B_{MP} = \frac{\mu_0}{2\pi} (I_A \frac{\cos \alpha_1}{l_A} + I_B \frac{\cos \alpha_2}{l_B} + I_C \frac{\cos \alpha_3}{l_C}) = \mu_0 (g_A I_A + g_B I_B + g_C I_C) / 2\pi, \quad (2)$$

где $\alpha_1(\alpha_2, \alpha_3)$ – угол между вектором $B_A(B_B, B_C)$ индукции МП, созданного током $I_A(I_B, I_C)$ фазы А (В, С), и осью МК; g_A, g_B, g_C – коэффициенты, выражаемые через x, h, d, γ [4].

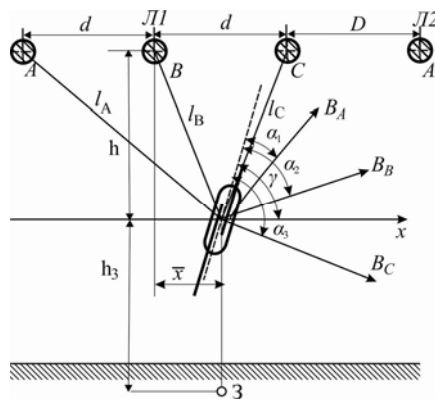


Рис.1. Расположение МК под фазами электроустановки

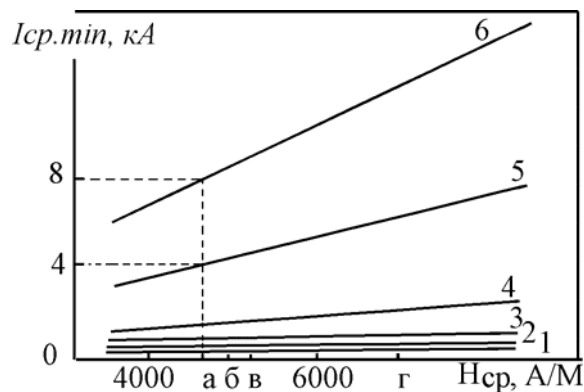


Рис. 2. Зависимости $I_{CP} = f(H_{CP})$: 1- сеть 3 кВ; 2 - 6 кВ; 3 - 10; 4 - 35; 5 - 110; 6 - 220 кВ; 1-4 двухфазное КЗ; 5-6 - однофазное КЗ.

Токи срабатывания, например, $I_{CPBC}^{(2)}$ и $I_{CPA}^{(1)}$ – при КЗ между фазами В и С или фазы А на землю определяются так [4] (считается, что в неповрежденных фазах тока нет):

$$I_{CPBC}^{(2)} = B_{CP} / \mu_0 (g_B - g_C), \quad I_{CPA}^{(1)} = B_{CP} / \mu_0 g_A. \quad (3)$$

Область использования защит на МК зависит от его чувствительности, а последняя от значения H_{CP} и координат МК. Координаты МК, максимально чувствительного к рассматриваемому виду КЗ, определяются минимумом соответствующей функции тока из (3), т.е. током $I_{CP.min}$, при котором МК еще срабатывает. Зависимости $I_{CP.min} \approx f(H_{CP})$ при $h=h_{min}$, где h_{min} – минимальное по технике безопасности, даны на рис.2. Точки а, б, в, г это минимальные H_{CP} для различных МК, выпускаемых в России (H_{CP} измерялось в КИ с переменным током). Из рис.2 видно, что $I_{CP.min}$ для указанных на нем напряжений составляет 0,29; 0,4; 0,53; 1,36; 4; 8 кА. Для ЭУ промышленных сетей 3-110кВ (кроме линий с ответвлениями) эти значения меньше реальных токов КЗ в конце защищаемого участка. Следовательно, МК обладают достаточной чувствительностью для построения защит этих ЭУ. В сельских сетях МК часто нечувствительны из-за низких уровней токов КЗ. Как показано в [7], подмагничивание постоянным током в обмотке управления позволяет уменьшить I_{CP} в 6-10 раз в зависимости от значения коэффициента K_B возврата МК, концентраторы – в 1,5-2 раза. Это значительно расширяет возможности построения защит на МК без ТА, а при использовании более чувствительных МК (например, японских) создает предпосылки для построения их и в сетях 500кВ.

2.2 Долговечность МК

Установлено [7], что $F_{CP}/F_{CP}^{\Pi} \neq \text{const}$, где F_{CP} измерялось в КИ с переменным током, а F_{CP}^{Π} – с постоянным. Это отношение даже для МК одного типа имеет разброс до 15%,

обусловленный разбросом времени t_{CP} срабатывания, где t_{CP} – время от момента трогания пластин МК до их первого замыкания. Поэтому результаты измерений на постоянном токе нельзя использовать для ЭУ переменного тока, также как и данные заводов изготовителей, поскольку диапазон F_{CP} для одного типа МК весьма велик. К тому же, F_{CP} изменяется в зависимости от длины КИ (l_k), в которой она измеряется, а H_{CP} , как и H_B и $K_B = B_B / B_{CP} = H_B / H_{CP}$, где B_B и H_B – индукция и напряженность поля, при которых МК возвращается в исходное состояние (после срабатывания) при одной и той же кратности $K = B_y / B_{CP}$ (где B_y – индукция воздействующего МП), практически постоянны. Поэтому перед установкой МК под шинами ЭУ необходимо измерить H_{CP} в лаборатории РЗ. В опытах [7,9] для пяти видов МК по 50 штук K менялось от 1 до 300. Из 250 штук залипло три МК. Поэтому при настройке защиты МК должны испытываться при всех возможных K (ЭУ) и при необходимости заменяться. Реально $K < 150$ даже при токе $I_{CЗ}$ срабатывания дифференциальной защиты $I_{CЗ} = 0,5 I_{РАБ, max}$, где $I_{РАБ, max}$ – рабочий максимальный ток ЭУ. Время t_{CP} срабатывания МК с увеличением K уменьшается. При $K \geq 1,5$ $t_{CP} \leq 1,5$ мс, при $1 < K \leq 1,4$ $t_{CP} = 6-2$ мс. При $K = 100-300$ $t_{CP} \approx 0,5-0,1$ мс. Для токовых защит зависимость $t_{CP} = f(K)$ значения не имеет, т.к. для реле тока $t_{CP} \leq 6$ мс считается вполне достаточным. При построении защит, сравнивающих фазы, t_{CP} является одной из составляющих погрешностей при формировании сравниваемых сигналов по моменту замыкания или размыкания контактов двух МК [9].

Время от первого замыкания до отскока при дребезге $t_{dp} \geq 30-150$ мкс. Этого достаточно для запоминания срабатывания. Поэтому t_{dp} для построения РЗ значения не имеет. t_{dp} резко возрастает при $K > 220-250$. Продолжительность подачи МП с частотой 50 Гц при $K \leq 150$ доводилась до 3 с, при $150 < K \leq 300$ – до 0,5 с. Имитировался и режим автоматического повторного включения. Перерывы варьировались от 0,3 до 20с. Эти режимы повторялись до 200 раз. Заметная разница между значениями параметров МК до и после испытаний возникала после их повторения более 120-150 раз при $K < 110-130$. Разрушений МК не было. Поскольку число КЗ в год на одной ЭУ не превышает 10, и подавляющее число защит имеют $I_{CЗ} > I_{РАБ, max}$, МК можно было бы использовать сто лет. Однако на МК под шинами защищаемой ЭУ в нормальном режиме работы постоянно действует МП, которое заставляет пластины МК колебаться (хотя и без замыкания), что со временем вызывает изменение его параметров. Чтобы исключить последствия колебания пластин в течение, например, 10 лет непрерывной работы МК до его замены, он должен иметь (считая для гарантии, что срабатывает каждую полуволну переменного тока, т.е. за год $3,2 \cdot 10^9$) ресурс срабатывания $R_{CP} = 3,2 \cdot 10^{10}$. Эта цифра не выходит за пределы (10^{12}) ресурса ртутных МК. Если менять МК каждые два-три года, то, как показали наши эксперименты, можно использовать обычные МК с $R_{CP} = 10^6$. Если использовать КЭМ-1 с $R_{CP} = 10^8$, то можно не менять его 4 года (время наблюдения, за которое параметры под воздействием управляющего МП с индукцией $B_y = 0,85 \cdot B_{CP}$ не изменились).

3. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА (МТЗ).

3.1 Особенности.

В МТЗ геркон совмещает функции преобразователя тока и реле тока. Подключив его контакты к счетчику или к расширителю импульсов, получаем МТЗ с выдержкой или без выдержки времени. Понятия токов $I_{CЗ}$ срабатывания и возврата $I_{BЗ}$ защиты и коэффициента $K_{ч}$ чувствительности, временные характеристики $t = f(I)$ остаются теми же, что и для МТЗ с ТА. Не применяются [5] коэффициент трансформации и коэффициент схемы. В установках постоянного тока $I_{BЗ} = I_{CЗ}$, а коэффициент $K_B = I_{BP} / I_{CP} = I_{BЗ} / I_{CЗ}$ и $K_B = K_{МК}$, где I_{CP} (I_{BP}) и $K_{МК}$ – ток срабатывания (возврата) реле и коэффициент возврата МК. В установках переменного тока (при наличии расширителей или счетчиков) $I_{BP} / I_{CP} \neq I_{BЗ} / I_{CЗ} = 1$.

3.2 Выбор $I_{CЗ}$ и координат МК.

Для исключения ложного срабатывания МК в МТЗ линии Л1 (рис.1) необходимо, чтобы [5]

$$B_{CЗ} > (B_{Л1} + B_{Л2} + B_3), \quad (4)$$

где $B_{Л1}$, $B_{Л2}$, B_3 , $B_{CЗ}$ – действующие на МК индукции МП от токов Л1 в режиме самозапуска, от

токов соседней линии Л2 при КЗ, от токов в земле при КЗ и при которой МК срабатывает.

На основе (3) представим составляющие из (4) следующим образом:

$$B_{C3} = \mu_0 I_{C3} \Delta g, \quad B_{Л1} = \mu_0 k_{C3П} I_{РАБ. \max}^{Л1} G, \quad B_{Л2} = \mu_0 I_{Л2}^{(1)} g_{Л2}, \quad B_3 = \mu_0 m I_{Л2}^{(1)} g_3, \quad (5)$$

где Δg – зависит от того, в каких фазах протекают токи, действующие на МК, например при КЗ между фазами А и В $\Delta g = (g_A - g_B)$, а в симметричных режимах $\Delta g = G$, где $G, g_{Л2}, g_3$ находятся аналогично g_A, g_B, g_C [5]; $k_{C3П}$ – коэффициент самозапуска электродвигателей (ЭД), питаемых от Л1; $I_{РАБ. \max}^{Л1}$ – максимальный рабочий ток в Л1; $I_{Л2}^{(1)}$ – ток в фазе А линии Л2 при КЗ на землю в сети с заземленной нейтралью; m – коэффициент, учитывающий, что помеху создает только часть тока КЗ в заземляющем устройстве (при симметричных режимах и двухфазных КЗ сумма МП фаз Л2, действующих на МК, близка к нулю, т.к. сумма токов фаз равна нулю, а разница в расстояниях от них до МК почти не оказывает влияния на сумму МП). Подставляя значения индукций из (5) в (4), исключив влияние Л2 ($g_{Л2} = 0$ при $\gamma = \gamma_1 = \arctg h / (D + d - x)$, где D – расстояние между фазами С и А линий Л1 и Л2 (рис.1)), имеем

$$I_{C3} = k_{ОТС} k_{C3} I_{РАБ. \max}^{Л1} G / \Delta g, \quad (6)$$

где $k_{ОТС}$ – коэффициент отстройки, учитывает погрешности расчета, неточность установки МК и влияние токов в земле. $k_{ОТС}$ отыскивается [5] с помощью ЭВМ путем перебора при разных K всех сочетаний погрешностей при установке МК. По результатам расчетов подбираются соответствующие выражения, например для ЭУ напряжением 6 кВ $k_{ОТС} = 1,5 + 0,11K$. В комплектном распределительном устройстве из-за влияния корпуса $k_{ОТС}$ на 10-20% больше.

В [5] показано, что МТЗ может быть выполнено на трех, двух и одном МК. При этом их координаты выбираются на основе решения относительно x, h, γ системы из трех уравнений: $G/\Delta g = 1, g_{Л2} = 0$ и, например, для МК реагирующего на КЗ между фазами А и В, $g_A = g_C$.

3.3 Чувствительность и область применения МТЗ на герконах.

Здесь необходимо при КЗ в конце защищаемого участка иметь $k_q \geq 2$, а в конце смежного $k_q \geq 1,6$, поскольку значение I_{CP} МК может превысить расчетное в 1,3 раза из-за погрешностей установки. Значение 1,3 получено на ЭВМ путем расчета I_{CP} по (3) при всех сочетаниях параметров и отклонений $\Delta h = \Delta x = \pm 5$ мм., $\Delta \gamma = \pm 5^\circ$. Если ток, рассчитанный по (6) при m -м виде КЗ, $I_{C3} < I_{CP \min}^{(m)}$, то следует принимать $I_{C3} \geq I_{CP \min}^{(m)}$, т.к. иначе МК не срабатывает. Наименьшие токи КЗ, определяющие возможность использования защиты, находятся по формуле

$$I_{K3 \min} = I_{CP \min}^{(m)} k_q \quad (7)$$

Расчеты показали, что для подавляющего большинства электроустановок 6-35 кВ промышленных предприятий, а в ряде случаев и 110-220 кВ, токи КЗ превосходят $I_{K3 \min}$ по (7).

4 ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

4.1 Реле полного сопротивления (РПС).

Выполняется (Рис.3) с помощью МК1, размещенного в МП токоведущих шин 2. С обмоткой 3 он образует реагирующий элемент, а с обмоткой 4 – датчик тока, 5- его контакты. Направленность действия элемента обеспечивают выпрямители 6, 7 и диод 8. МП, создаваемое токами фаз защищаемой ЭУ действует на контакты 5 геркона 1 и одновременно наводит напряжение в обмотке 4, которое через конденсатор 9, усилитель 10 и выпрямитель 6 подводится к обмотке 3. На нее подается и напряжение от блока 11, контролирующего междуфазное напряжение U . В режимах без КЗ в 3 протекает небольшой ток небаланса. При КЗ напряжение, получаемое от обмотки 4, возрастает, а от блока 11 уменьшается. Ток в обмотке 3 увеличивается. Если МДС, созданная токами фаз и обмотки 3, достаточна для срабатывания МК1, то контакты 5 замыкаются, и в логическую часть 12 подается сигнал. Резистор 13 и МК

14 с обмоткой 15 предназначены для уменьшения коэффициента K_B возврата реле. Результирующая индукция вдоль оси МК1

$$\dot{B}_p = |\dot{B}_1| - |\dot{B}_2| + \dot{B}_{Л1}; \quad |\dot{B}_1| = |\dot{k}_2 \dot{I}_m|, \quad |\dot{B}_2| = |\dot{k}_3 \dot{U}|, \quad (8)$$

$$\dot{B}_{Л1} = [\mu_0 / (2\pi)] (\dot{I}_A g_A + \dot{I}_B g_B + \dot{I}_C g_C) = [\mu_0 / (2\pi)] \dot{I}_m \Delta g = \dot{k}_1 \dot{I}_m, \quad (9)$$

где $|\dot{B}_1|$, $|\dot{B}_2|$ и $\dot{B}_{Л1}$ - индукции МП, создаваемых токами от выпрямителей 6, 7 и токами фаз, соответственно, $|\dot{B}_1| - |\dot{B}_2| = B_{обм}$ - составляющая индукции $\dot{B}_p$, создаваемая обмоткой 3; $\dot{I}_m$ - амплитудное значение токов в фазах А, В, С; $\dot{k}_1$, $\dot{k}_2$, $\dot{k}_3$, $\dot{k}_4$ - коэффициенты преобразования.

Для срабатывания МК необходимо, чтобы $B_p \geq B_{CP}$. Представим B_{CP} в виде kI_m , где k зависит от F_{cp} и положения МК. Тогда, учитывая (8),(9), условие срабатывания и сопротивление $\dot{Z}_p$ на зажимах при его выполнении примут вид:

$$|\dot{k}_1 \dot{I}_m| + |\dot{k}_2 \dot{I}_m| = |\dot{k}_3 \dot{U}| + kI_m, \quad \dot{Z}_p = (|\dot{k}_1| + |\dot{k}_2| - k) / |\dot{k}_3| \quad (10)$$

Выражение для $\dot{Z}_p$ соответствует условиям срабатывания РПС [3]. Лабораторные испытания подтвердили, что реле обладает свойствами РПС.

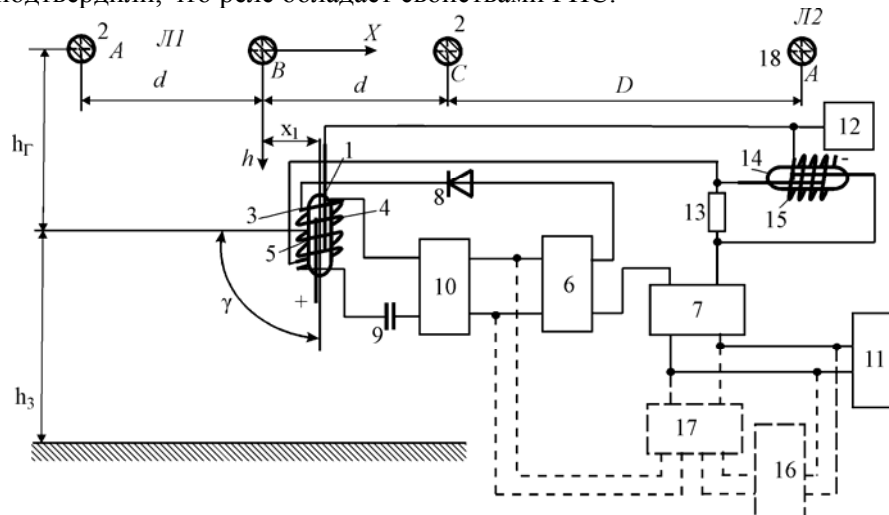


Рис.3 Функциональная схема реле сопротивления на герконах

4.2 Направленное реле сопротивления (НРС) и время t_{CP}^P его срабатывания.

НРС получается при добавлении в схему (рис.3) формирователя 16 и сумматора 17 (штриховые линии) и удалении связи между блоками 7 и 11 [8]. Тогда напряжение, создающее $\dot{B}_2$, снимается с выхода сумматора 17 (в нем вычитаются напряжения от блоков 16 и 10), и

$$|\dot{B}_2| = |\dot{k}_4 \dot{U} - \dot{k}_2 \dot{I}_m| \quad (11)$$

С учетом (8)-(11) выражение $B_p = B_{CP}$ приводится к уравнению окружности, смещенной в третий квадрант, которое, как известно, соответствует характеристике срабатывания НРС. t_{CP}^P срабатывания НРС – время, проходящее с момента возникновения КЗ до появления сигнала на выходе блока 12, складывается из времени t_b задержки в цепях реле, времени t_{CP} срабатывания МК ($t_{CP} \leq 1,5$ мс при $B_p/B_{CP} \geq 1,5$) и времени $t_{зап}$ запаса. Для исключения появления сигнала на выходе блока 12 при импульсных помехах необходимо, чтобы $t_{CP}^P > t_{П}$ – времени действия помехи. Последнее практически всегда выполняется, так как $t_b \leq 20$ мс. С дребезгом контактов не считаемся (см. выше). Откуда, $t_{CP}^P \leq 0,03$ с.

4.3 Величины, подводимые к реле сопротивления.

Реле сопротивления от междуфазных КЗ, как правило, включаются на междуфазные напряжения и разность фазных токов, чтобы подвести к реле величину, пропорциональную расстоянию l от места включения защиты до точки КЗ. Найдем значения коэффициентов g_A , g_B и g_C , обеспечивающих указанную пропорциональность для различных видов КЗ. Рассмотрим, например, замыкание между фазами А и С. При этом $\dot{I}_B^{(2)} = 0$, $\dot{I}_A^{(2)} = -\dot{I}_C^{(2)}$, и индукция МП вдоль оси МК

$$B_{AC}^{(2)} = [\mu_0 / (2\pi)] (\dot{I}_A^{(2)} g_A + \dot{I}_C^{(2)} g_C) = [\mu_0 / (2\pi)] \dot{I}_m^{(2)} (g_A - g_C) \sin \omega t,$$

а напряжение на вторичной обмотке трансформатора напряжения

$$U_{AC}^{(2)} = k_U (\dot{I}_A - \dot{I}_C) Z_{уд} l = 2k_U Z_{уд} l \cdot \dot{I}_m^{(2)} \sin \omega t,$$

где $\dot{I}_m^{(2)}$ - амплитудное значение тока в поврежденных фазах; t - время; k_U - коэффициент преобразования блока 11; $Z_{уд}$ - удельное сопротивление защищаемой линии.

К реле подводится отношение $U_{AC}^{(2)}$ к $B_{AC}^{(2)}$, то есть

$$U_{AC}^{(2)} / B_{AC}^{(2)} = [2\pi / \mu_0] 2k_U Z_{уд} l / (g_A - g_C) \quad (12)$$

Из (12) видно, что величина $U_{AC}^{(2)} / B_{AC}^{(2)}$ пропорциональна l при любых g_A , g_B и g_C , кроме $g_A = g_C$. При трехфазном КЗ отношение $U_{AC}^{(3)} / B_{AC}^{(3)}$ пропорционально l при координатах, удовлетворяющих условиям: $g_A = -g_C$, $g_B = 0$ [8]. Таким образом, при междуфазных КЗ к зажимам реле сопротивления подводится величина, пропорциональная l :

$$k_U U_{K3} / B_{K3} = 2\pi k_U Z_{уд} l / (\mu_0 \Delta g),$$

где U_{K3} и B_{K3} - напряжение и индукция $B_{Л1}$ при КЗ на Л1, а Δg – определяется по (5).

4.4 Выбор сопротивления Z_{CP} срабатывания защиты и ее чувствительность.

Первичные Z_{CP} и чувствительность определяются также, как и в традиционных защитах, коэффициенты отстройки рассчитываются по той же методике, что и в МТЗ на МК (учитываются погрешности из-за помех и неточностей установки МК). Из-за них длина защищаемых зон у предлагаемой защиты оказалась несколько меньшей, чем у традиционных.

Наибольшая чувствительность получается при таких координатах МК, когда B_r из (8) максимальна. Они находятся по производным функции Δg по x и y с учетом h_{min} и условий, приведенных выше. Для традиционных РС одним из основных критериев при оценке чувствительности является ток точной работы. Здесь это индукция точной работы, обусловленная F_{cp} срабатывания МК и параметрами реле. Важной характеристикой чувствительности является максимальное первичное сопротивление срабатывания $Z_{CP,max}$, ограничивающее защищаемую зону. Определение $Z_{CP,max}$ и проверка чувствительности осуществляется по методике, основанной на построении зависимостей индукций $B_{Л1}$, $B_{обм}$ и B_{CP} от Z_{K3} [8].

5 Принципы построения и модели дифференциальных защит (ДЗ) на МК.

Построение ДЗ, сравнивающих токи по концам защищаемого элемента, сводится к следующему [6]. Герконы 1 и 2 (рис. 4), установленные, например, под шинами одноименных фаз параллельных линий W1 и W2 со стороны источника питания, снабжаются обмотками 3 и 4. Обмотка 3 используется в качестве источника ЭДС, а обмотка 4 как управляющая. Обмотка 3 каждого МК через конденсатор 5 и усилитель 6 подключается к обмотке 4 другого МК, контакты 7 и 8 МК - к исполнительному органу 9, отключающему выключатель 10, если срабатывает МК1 и напряжение U_1 на его обмотке 4 меньше U_2 на обмотке 4 геркона 2. Если срабатывает МК2 и $U_2 < U_1$, то отключается выключатель 11. Выявление меньшего напряжения осуществляется в блоке 12. Оно позволяет различать на какой из линий произошло КЗ. Рис.4,б иллюстрирует соотношения между индукциями МП, действующими на МК1 в режимах нагрузки или внешних КЗ и КЗ на линии W1 со стороны W1 (B_1 и B_1' соответственно) и со

стороны обмотки 4 (B_4 и B'_4), причем необходимо, чтобы

$$B_4 - B'_4 \geq B_{CP} = \mu_0 F_{CP} / l_K \quad (13)$$

При этом, как и поперечная ДЗ параллельных линий с ТА [3], защита на МК не должна срабатывать а) при внешних КЗ из-за небаланса индукции $B_{НБ, max}$; б) в режиме отключения одной из цепей с другого конца, в) каскадного отключения при КЗ на землю, т.е.:

$$а) B_{CP} > B_{НБ, max}, \quad B_{НБ, max} > B_1 - B_4 + B_n, \quad б) B_{CP} > B_{РАБ, max}, \quad в) B_{CP} > B_{нп, max} \quad (14)$$

$$B_4 = I_4 w_4 / l_4, \quad I_4 = k_y I_3, \quad I_3 = E_3 / Z, \quad E_3 = 4.44 f w_3 B_2 S, \quad B_1 = K_1 K_2 B_2 \quad (15)$$

Индукции B_1 , B_2 , $B_{РАБ, max}$ созданы МП от токов всех фаз линий W_1 , W_2 , а B_n - помехами; B_1 , B_2 рассчитываются для всех видов внешнего КЗ (выбирается наибольшее), $B_{РАБ, max}$ - при $I_{РАБ, max}$ при работе одной линией; K_1 и K_2 - коэффициенты, учитывающие разные сопротивления линий, погрешности установки МК1 и МК2, а также влияние соседних линий; I_3 (I_4)- ток в обмотке 3 (4) геркона 2 (1); w_3 и w_4 - число витков в обмотках 3 и 4; l_3 и l_4 - длина катушки индуктивности на МК; S -площадь витков обмотки 3 (перпендикулярная B_2), Z - сопротивление обмотки 4 и усилителя 6; K_y -коэффициент усиления по току, определяется из (15).

$B_{НБ, max}$ может быть значительным, т.к. зависит от K_2 , кратности K , несовпадения расчетного K_y с выставленным, а также от влияния обмоток друг на друга [8].

По рассмотренному принципу можно построить ДЗ мощного электродвигателя (ЭД), генератора, двухобмоточного трансформатора (Тр) и преобразовательной установки. Для ЭД герконы устанавливаются со стороны ввода питания и нулевых выводов каждой фазы (схема на рис.3 без блока 12). Для Тр - со стороны высшего и низшего напряжений. Выбор параметров для ЭД осуществляется по (а) из (14) и (15). Для Тр по (а,б) из (14) и (15), но защита усложняется из-за отстройки от бросков тока намагничивания и напряжения. ДЗ можно построить на размыкающем МК с обмоткой управления, например для преобразовательных установок [12], где МК (закреплены в МП фаз со стороны высшего напряжения Тр установки) в режиме нагрузки находятся в сработавшем состоянии, а их контакты разомкнуты под действием МП с индукцией, созданной постоянным током $I_{II} > I_{CP}$. Ток I_{II} в обмотке зависит от сопротивления магниторезистора, закрепленного в МП шин постоянного тока преобразователя. Если вблизи них установить МК с обмоткой, питаемой от максиселектора, подключенного к ТА низшего напряжения Тр, то получается очень простая защита выпрямителя. В конце 80х она была внедрена на Кировоградском металлургическом комбинате и подводных лодках.

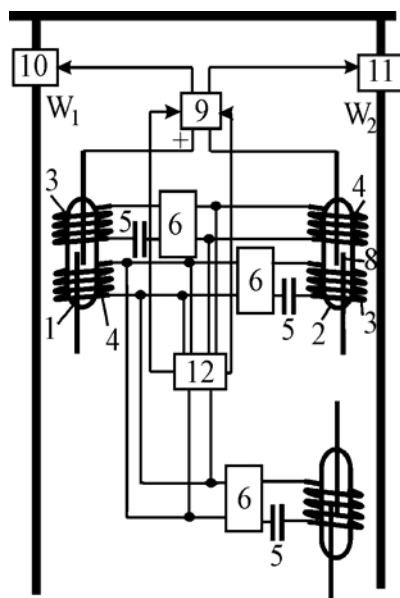


Рис.4 - Дифзащита двух параллельных линий на МК

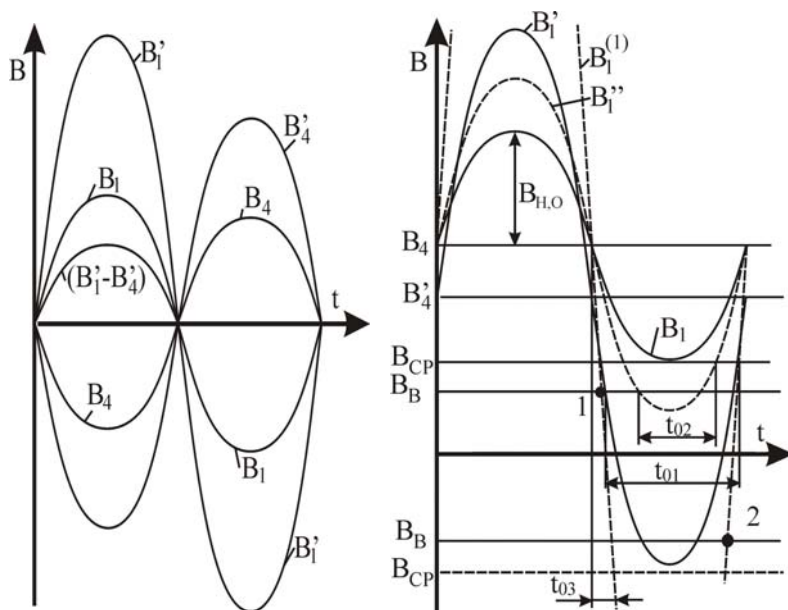


Рис.5 - Индукции МП, действующие на МК в режимах нагрузки и КЗ: а) в дифзащите, б) в диффазной защите.

6. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНЫХ ЗАЩИТ

Для срабатывания реле со сравнением фаз необходимо, чтобы [3]:

$$-(\varphi_B - \varphi_{гр} + \delta_B - \delta_A) \leq \varphi < \varphi_A - \varphi_{гр} + \delta_A - \delta_B, \quad (16)$$

где φ_A, φ_B - заданные области изменения сравниваемых величин А и В; δ_A и δ_B - углы между точкой перехода через 0, например, кривых тока и началом областей φ_A и φ_B .

Сравнение осуществляется сопоставлением полувольт тока одной или разной полярности. Полярность срабатывания МК, установленных в поле фаз ЭУ, обеспечивается с помощью обмотки, в которую подается такой постоянный ток, что в режимах нагрузки контакты МК замкнуты. На рис. 5,б этому току соответствуют созданный им МП с индукцией B_4 или B_4' . Здесь B_{cp} и B_B - индукции МП, действующие на МК в моменты срабатывания и возврата, $B_{н.а}$ - амплитуда индукции МП от тока $I_{РАБ.макс}$ в фазе ЭУ, $B_1, B_1^{(1)}, B_1''$ - индукции при перегрузке и КЗ с различной кратностью К тока КЗ по отношению к $I_{РАБ.макс}$, t_{01}, t_{02} - время разомкнутого состояния контактов МК, t_{03} - время между срабатываниями при $K=8$.

Для использования метода необходимо запоминать отпадание одного МК на время $t_A = \varphi_A / \omega$ (для первой из сравниваемых величин), а другого на время $t_B = \varphi_B / \omega$ (для второй). t_A, t_B обеспечиваются элементами ПАМЯТЬ, а $t_{гр} = \varphi_{гр} / \omega$ элементом ВРЕМЯ. При $B_1^{(1)} > (3-8) B_H$ МК отпадает дважды за полупериод промышленной частоты (рис.5 точки 1 и 2). Для исключения влияния второго отпадания необходимо, чтобы сигнал о первом отпадании запоминался на 0,01 с, т.к. $\varphi_A = \pi$. Разность $\delta_A - \delta_B$ зависит от амплитуд сравниваемых величин и t_{CP} . Так, если $B_1 > 2,5 B_H$ (соответствует $I_{кз} \geq 2,5 \cdot I_{РАБ.макс}$) и $k_{ОТС} = 1,5$; $k_B = 0,4 - 0,7$, то $\delta_A - \delta_B = 15-20^\circ$; если для одной $1,5 B_H < B_1 < 2 B_H$, а для другой $B_1 \geq (45-50) B_H$, то $\delta_A - \delta_B = 65-75^\circ$. Эти данные получены экспериментально. Считая в соответствии с [3], что в (16) выражение в скобках и правая часть равны $\pi / 2$, задавшись $\varphi_A = \pi$, находим

$$\varphi_{cp} = \pi / 2 + \delta_A - \delta_B, \quad \varphi_B = \pi + \delta_A - \delta_B.$$

Примером использования рассмотренного принципа служит защита ЭД [12]. Она выявляет междофазные и витковые замыкания, а также обрыв фаз, контролируя время совпадения полувольт тока. Первые фиксируются с помощью МК, установленных со стороны нулевых выводов и ввода питания, вторые и третьи - со стороны ввода, $\varphi_{гр}$ выбирается для каждого вида повреждения в соответствии с известными [14] соотношениями фаз токов.

Отметим следующее. Отстройка от влияния помех путем выбора координат МК в ряде случаев вступает в противоречие с чувствительностью, которую можно обеспечить, установив дополнительные МК, действующие при КЗ на соседних ЭУ и выводящие на 2-4с защиту неповрежденной ЭУ. Несмотря на то, что МК с обмотками устанавливаются на безопасном расстоянии от шин ЭУ, при их реализации могут потребоваться промежуточные трансформаторы и ограничители напряжения для защиты от перенапряжений полупроводниковых компонентов и обслуживающего персонала. Возможность повышения надежности защит на МК и расширения области их использования таятся в исключении обмоток на них путем совместного использования МК и микропроцессоров, если моделировать переменный ток в шине на основе измерения временных характеристик МК, например времени замкнутого состояния замыкающего МК, что, как показано в [15], вполне реально.

В данной работе из-за ограниченного объема не рассматриваются вопросы крепления МК вблизи токопроводов ЭУ. Предложено 14 конструкций для их крепления, защищенных патентами, но для многих ЭУ они еще не разработаны и только две внедрены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Симметричные российские язычковые герконы (МК) можно использовать для построения РЗ без предъявления к ним каких-либо требований. Методика определения тока в шинах ЭУ, при котором МК, устанавливаемый на безопасном от них расстоянии, срабатывает, вполне приемлема для инженерных расчетов.

2. Наряду с чувствительностью и ресурсом срабатывания МК, важную роль для построения защит играют методика выбора координат его месторасположения и точность крепления в расчетную точку, так как они дают возможность отстраиваться от влияния токов КЗ в земле в соседних фазах и электроустановках и уменьшить погрешности при расчете параметров защит.

3. На МК без обмоток можно строить максимальные токовые защиты, на МК с одной обмоткой управления – дистанционные и дифференциально-фазные, с двумя или с одной – дифференциальные. Разработанные принципы построения могут быть положены в основу создания одной из систем РЗ, претендующих на дублирование традиционной и ТА одновременно. Уже можно использовать МТЗ в сетях 3-35кВ и дифференциальную защиту на одном МК.

4. Необходимо продолжить исследования в направлении совершенствования и создания дистанционных, дифференциальных и дифференциально-фазных защит. Перспективным представляется построение их на МК без обмоток путем использования его временных характеристик и микропроцессора. Следует уделить внимание и вопросам крепления МК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дьяков А.Ф. Электроэнергетика мира в начале XXI столетия (по материалам 39-й сессии СИГРЭ, Париж) /Дьяков А.Ф и др.//Энергетика за рубежом – 2004. - №4-5.
- [2] Л.А. Кожович, М.Т. Бишоп. Современная релейная защита на базе катушки Роговского. Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем. Сборник докладов конференции, CIGRE, Москва, 2009.
- [3] Федосеев А.М. Релейная защита. – М.: Энергоиздат. 1984-520с.
- [4] Клецель М.Я, Мусин В.В., О построении на герконах защит высоковольтных установок без трансформаторов тока. Электротехника. 1987. №4. С. 11-13.
- [5] Клецель М.Я, Мусин В.В., Выбор тока срабатывания максимальной токовой защиты без трансформаторов тока на герконах. Промышленная энергетика. 1990. - №4. с.32-36.
- [6] Клецель М.Я. Принципы построения и модели дифференциальных защит на герконах. Электротехника. 1991. №10. С.47-50.
- [7] Клецель М.Я., Алишев Ж.Р., Мануковский А.В. Свойства герконов, применяемых в релейной защите. Электричество. 1993. №9. С 18-21.
- [8] Клецель М.Я, Жуламанов М.А. Реле сопротивления. Электротехника. 2004. №5. С.38-44.
- [9] Клецель М.Я., Майшев П.Н. Особенности построения на герконах дифференциально-фазных защит трансформаторов. Электротехника. 2007. №12. С.2-7.
- [10] Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые контакты и изделия на их основе: Монография. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 408с.
- [11] Румянцев Ю.Г. Определение напряженности магнитного поля вблизи токопровода. Известие вузов. Энергетика. 1963. №4. С. 33-39.
- [12] Инновационный патент № 22206. Казахстан. Устройство для дифференциальной защиты преобразовательной установки. Клецель М.Я. Оpubл. 15.01.2010 бюл. №1
- [13] Инновационный патент № 22073. Казахстан. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от замыканий обмотки статора. Клецель М.Я. Оpubл. 15.12.2009 бюл. №12.
- [14] Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. - М.: Энергоиздат. 1987-248с.
- [15] Клецель М.Я., Майшев П.Н., Жантлесова А.Б. Способ определения тока.//

**4-я Международная научно-техническая конференция
Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
г. Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 года**

Электроэнергетическое обследование - этап реализации концепции энергосбережения.
Материалы конференции НИТПУ – Томск: Из-во ООО СПБ «Графикс», 2012. – 280с.