

٦Ìt

Москва, 29 сентября - 1 октября

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА



РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ 2021

Анализ и проверка соответствия характеристик трансформаторов тока классов Р и PR условиям функционирования дифференциальных защит шунтирующих реакторов производства ООО НПП "ЭКРА" при наличии в токах КЗ апериодической составляющей

С.Л. КУЖЕКОВ, А.А. ДЕГТЯРЁВ, А.А. ОТКИДЫЧЕВ, А.А. ШУРУПОВ, Н.А. ДОНИ, А.А. ПЕТРОВ, Л.Н. КОСТАРЕВ

ООО НПФ «Квазар» - ООО НПП «ЭКРА»

Россия

Дегтярёв Андрей Александрович



ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Особенности шунтирующих реакторов (ШР), как объектов дифференциальной защиты:

- ✓ высокое значение постоянной времени затухания апериодической составляющей (*Tp*), возникающей при включении под рабочее напряжение может достигать 1 с. Ток включения ШР составляет несколько сотен ампер, в течение длительного переходного процесса возможно насыщение магнитопроводов трансформаторов тока (TT) как на линейном вводе (ЛВ), так и на нейтральных вводах (HB) шунтирующего реактора. При этом возможны неправильные срабатывания продольных и поперечных дифференциальных защит ШР, уставки которых выбраны по существующим методикам;
- ✓ большие токи при коротком замыкании (КЗ) на линейном вводе (ЛВ) ШР. При этом возможно замедление в срабатывании дифференциальной отсечки продольной дифференциальной защиты ШР вследствие насыщения магнитопровода ТТ ЛВ.







ТИПОВАЯ ОСЦИЛЛОГРАММА ТОКА КЗ НА ЛИНЕЙНОМ ВВОДЕ ШР



Вторичный ток фазы *В* ЛВ ШР. ТТ не насыщается

Вторичный ток фазы *С* ЛВ ШР. ТТ не насыщается

ı[ر

Īi



-

4



ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования являлась разработка методик проверки соответствия характеристик трансформаторов тока классов Р и РR условиям функционирования дифференциальных защит ШР производства ООО НПП "ЭКРА" при наличии в токах КЗ апериодической составляющей.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 🖌 проведен анализ методик расчёта уставок дифференциальных защит ШР;
- ✓ выбраны и обоснованы расчетные режимы работы ШР;
- ✓ уточнена методика расчёта уставок дифференциальных защит ШР;
- ✓ разработаны методики и примеры проверки TT классов P и PR для дифференциальных защит ШР.







РЕЖИМЫ РАБОТЫ ОДНОФАЗНЫХ ШР

Основными переходными режимами работы ШР являются:

- ✓ однофазное K3 в зоне действия продольной ДТЗ ШР;
- ✓ включение под рабочее напряжение с наличием в токе апериодической составляющей;
- ✓ бросок намагничивающего тока в обмотке ШР при включении под рабочее напряжение;
- ✓ замыкания витков обмотки, в том числе на корпус;
- ✓ внешние однофазные КЗ.





ſĮ

ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДТЗ ОДНОФАЗНЫХ ШР

1. Проверка в точке К2 должна производиться при однофазном К3 в зоне действия защиты в максимальном режиме работы ЭЭС. Это обусловлено требованием быстродействия дифференциальной отсечки.

2. Замыкание на корпус в точке 3, является простым, а не коротким замыканием. В пределе по TT HB1 ток не проходит. Дифференциальный и тормозной токи продольной ДT3 ШР равны половине тока реактора. При этом ток срабатывания защиты равен начальному току срабатывания. Если начальный ток срабатывания превышает 0,5, то продольная ДT3 не будет реагировать на повреждение. Однако в этом случае с большим запасом по коэффициенту чувствительности правильно действует поперечная дифференциальная защита ШР. По указанной причине не целесообразно данный режим считать расчётным для выбора начального тока срабатывания продольной ДT3 ШР.

3. Внешние КЗ допустимо не учитывать, так как при этом по ШР проходит затухающий апериодический ток.



Īi

ı[ر

ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДТЗ ОДНОФАЗНЫХ ШР



4. На витковые замыкания в обмотке ШР без связи с землёй продольная ДТЗ не реагирует по принципу действия, так как ток, входящий в ветвь 1 ШР $i_{\rm BX1}$, равен току, выходящему из этой ветви $i_{\rm BbIX1}$. На такие повреждения реагирует поперечная ДТЗ ШР.

9

•



, it

ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДТЗ ОДНОФАЗНЫХ ШР

5. Если происходит замыкание на землю в верхней (ближе к ЛВ) или средней части обмотки, то такое повреждение сопровождается большими токами КЗ и дифференциальный ток многократно превышает номинальный.

В случае замыкания на землю в нижней части обмотки ШР (вблизи HB) одного или нескольких витков, ток на стороне ЛВ увеличивается незначительно, хотя в короткозамкнутых витках протекает значительный ток K3. Указанный ток проходит через TT стороны HB, причём его направление практически противоположно направлению тока $i_{\rm BX1}$. Значение тока через TT HB можно оценить по выражению:

 $i_{\text{BX.1}} \cdot (w - w_{\text{B.3}}) = i_{\text{B31}} \cdot w_{\text{B.3}}$

где *w* – число витков ветви 1; *w*_{в.3} – число замкнувшихся витков.

Ток виткового замыкания при наличии связи с землёй существенно увеличивает дифференциальный ток и повышает чувствительность продольной ДТЗ ШР.



УЧЁТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Существуют три случая, при которых появляются апериодические составляющие в первичных токах TT:

 неуспешное автоматическое повторное включение поврежденного элемента или включение на короткое замыкание, существовавшее в цепи;

✓ несинхронные включения генераторов, сопровождающиеся биениями токов и напряжений;

🗸 внезапное КЗ в цепях объекта защиты.

В первых двух случаях ток коммутируется выключателем, скорость движения контактов которого выше скорости изменения принужденной периодической составляющей. Пусть напряжение в сети изменяется по закону (где γ – фаза включения): $u = U_m \sin(\omega t + \alpha) = U_m \sin \gamma$.

В пределах полупериода значения у равновероятны, поэтому плотность распределения вероятности равна:

$$f(\gamma)=1/\pi.$$

Значительные апериодические составляющие *I*_{a.0} > 0,866 *I*_{п.*m*} имеют место в диапазоне γ от -π/6 до π/6. Тогда вероятность возникновения указанных составляющих равна:

$$p_{\mathrm{an}} = p\left(-\frac{\pi}{6} \le \gamma \le \frac{\pi}{6}\right) = \int_{-\pi/6}^{\pi/6} f(\gamma) d\gamma = \frac{1}{3}.$$



УЧЁТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Исследования [6] показали, что плотность распределения фазы включения выключателей может существенно отличаться от равномерной. При этом вероятность получения больших начальных значений апериодической составляющей снижается до значения 0,1 и менее.

По данным измерений, проведенных представителями различных организаций на отдельных присоединениях ОРУ-500 Ростовской АЭС, равно_____

$$K_r = \frac{B_r}{B_s} = 0,86.$$

где B_r – предельная остаточная магнитная индукция; B_s – амплитуда магнитной индукции насыщения.

В стандарте МЭК по дистанционной защите [8] рекомендуется принимать значение

$$B_r = 0.75B_s$$
.

В [9] отмечено, что в общем случае содержание апериодической составляющей в первичном токе ТТ не превышает 70%, а значения остаточной индукции, превышающие 60 – 70% от предельной, были выявлены примерно в 27% случаев, т.е. p_r = 0,27.

Вероятности глубокого насыщения сердечников ТТ в переходном режиме ($p_{\rm r.н}$) можно оценить с помощью приближённого выражения, в котором вероятность совпадения направления перемагничивания сердечника апериодической составляющей и знака остаточной магнитной индукции принята равной 0,5:

 $p_{\text{\tiny \Gamma.H}} = 0.5 \cdot p_{\text{a}} \cdot p_r = 0.5 \cdot 0.33 \cdot 0.27 \approx 0.045.$



ОСТАТОЧНАЯ МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В ТТ КЛАССА Р



где R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки TT; w_2 – число витков вторичной обмотки TT; s – площадь сечения магнитопровода TT; $B_{r,max}$ – максимальное значение остаточной индукции, полученному для каждого образца физической модели TT; $B_{r,u_{3M}}$ – значение остаточной индукции, измененное после протекания тока нагрузки.





ОСТАТОЧНАЯ МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В ТТ КЛАССА Р

1. Установлено, что сердечники ТТ класса Р размагничиваются синусоидальными токами нагрузки. Решающий вклад в значение остаточной индукции вносят:

- ✓ амплитуда магнитной индукции, обусловленная током нагрузки;
- ✓ суммарная длительность протекания указанного тока.

2. Среднее значение коэффициента размагничивания при значении амплитуды магнитной индукции, соответствующем номинальном режиму, составляет 25 – 30%, что соответствует среднему значению коэффициента остаточной намагниченности равному 65 – 60 %.

3. В эксплуатации при условии применения современных микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики коэффициент размагничивания сердечников пятиамперных ТТ класса Р может приближаться к значению 25 %. У одноамперных ТТ в указанных условиях коэффициент размагничивания составляет порядка 12 %.

4. При проверках и выборе TT класса P для быстродействующих устройств релейной защиты значение коэффициента остаточной намагниченности 86 % целесообразно принимать только при учете режима AПВ. В остальных случаях целесообразно снизить требования к значению K_r : для пятиамперных TT до 65 %, а для одноамперных до 75 %.



ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. Определяют значения времени до насыщения ТТ всех сторон ШР при протекании тока включения. А также вычисляют значения базисных токов $I_{\rm E.crop}$ на всех сторонах защищаемого объекта.

2. Токи, проходящие через ТТ сторон ЛВ и НВ в режиме включения ШР под напряжение, переводят в относительные единицы по выражению:

$$I_{\rm вкл. ctop*} = \frac{I_{\rm вкл. ШР}}{m \cdot I_{\rm Б. ctop} \cdot k_{\rm TT. ctop}},$$

где *m* – коэффициент стороны ШР: для стороны ЛВ *m* = 1, а для НВ1 и НВ2 *m* = 2; *I*_{вкл.ШР} – первичный ток включения ШР; *I*_{Б.стор}, *k*_{TT.стор} - соответственно, базисный ток стороны ШР и коэффициент трансформации ТТ на этой стороне.

3. По значению *t*_{нас} для всех TT определяют номера *n* периодов, следующих за периодом, на котором было насыщение. В качестве расчётного принимают TT с меньшим временем до насыщения.

4. По данным диаграммам для периода *n* определяют относительное действующее значение первой гармоники намагничивающего и вторичного токов TT с ПХН по отношению к действующему значению периодической составляющей тока включения, приведённого к вторичной стороне TT (*I*_{0.1.*n**} и *I*_{2.1.*n**}).





ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Действующее значение первой гармоники намагничивающего тока насыщенного ТТ с ПХН $I_{0.1*}$ 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0 20 40 60 160 180 80 100 120 140 200 0 —_____Tp=0,05 c —______Tp=0,15 c —Tp=0,25 c —Tp=0,4 c —______Tp=0,6 c —______Tp=0,8 c ——Tp=1,0 c —_____Tp=1,2 c —Tp=1,4 c п —Tp=1,6 c







ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

5. Вычисляют относительное действующее значение первой гармоники дифференциального тока по выражению

$$I_{\mathcal{A}^*} = I_{\text{вкл.стор}^*} \cdot (I_{0.1.n^*} + \Delta f_{\text{выр}} + \Delta f_{\Pi TT})$$

где $\Delta f_{\rm выр}$, $\Delta f_{\rm AT}$ – относительные погрешности выравнивания токов TT в терминале защиты и во вспомогательном AT, соответственно.

6. Относительное действующее значение первой гармоники тормозного тока определяют с помощью следующего выражения:

для случая насыщения ТТ стороны ЛВ

для случая насыщения TT стороны HB1 или (HB2)

$$I_{_{T*}} = I_{_{BKJ.HB1^*}} + I_{_{BKJ.HB2^*}} = I_{_{BKJ.JB^*}};$$

$$I_{\rm T*} = 0.5 \cdot I_{\rm BKJ.*} \cdot (1 + I_{2.1.n*}).$$

7. По наихудшему режиму подбирают значения начального тока срабатывания $I_{Д.0*}$, тока начала торможения $I_{T.0*}$ и коэффициента торможения $k_{\rm T}$, при которых порог срабатывания чувствительного органа защиты составляет 1,2 $I_{Д*}$.





РАСЧЁТ И ПРОВЕРКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОТСЕЧКИ ПРОДОЛЬНОЙ ДТЗ ШР

Ток срабатывания дифференциальной отсечки вычисляется по выражению:

$$I_{_{
m orc*}} = K_{_{
m orc}}I_{_{
m BKJ, crop*}} \cdot (I_{_{0.1*}} + \Delta f_{_{
m Bbp}} + \Delta f_{_{
m AT}}),$$
где $K_{_{
m orc}}$ = 1,2 - коэффициент отстройки

1. Время до насыщения ТТ ($t_{\rm hac}$) сравнивается с временем принятия решения быстродействующим элементом дифференциальной отсечкой продольной ДТЗ ШР о режиме КЗ в зоне действия ($t_{\rm pem.1}$).

2. Если $t_{\text{нас}}$ превысило $t_{\text{реш.1}}$, то дифференциальная отсечка соответствует условиям применения. В противном случае для периода n = 2 определяют $I_{2.1.n^*}$.

3. Ток, проходящий через ТТ ЛВ при КЗ в расчетной точке, переводят в относительные единицы по выражению

$$I_{\mathrm{TT.JB}^*} = \frac{I_{\mathrm{TT.JB}}}{I_{\mathrm{5.JB}} \cdot k_{\mathrm{TT.JB}}}.$$

4. Вычисляют относительные действующие значения первой гармоники дифференциального тока на втором периоде КЗ (n = 2) по выражению: $I_{Д.1.n^*} = I_{TT.JB^*} \cdot I_{2.1.n^*}$

$$I_{_{\mathrm{otc}*}} < I_{_{\mathrm{J}.1.n^*}}.$$



РАСЧЁТ И ПРОВЕРКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОТСЕЧКИ ПРОДОЛЬНОЙ ДТЗ ШР

6. Если предыдущее условие выполняется, то проверка продольной дифференциальной отсечки при КЗ в зоне действия закончена с положительным результатом.

7. Если условие не выполняется, то следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей в пределах 4 – 10 мм²) и повторно выполнить расчет времени до насыщения ТТ на первом периоде КЗ.

Если вычисленное повторно время до насыщения превысит паспортное значение времени принятия решения дифференциальной отсечкой о КЗ в зоне действия, то ТТ пригоден для использования в схеме продольной ДТЗ. Проверка закончена с положительным результатом. Иначе – ТТ не пригоден для использования в схеме продольной ДТЗ данного объекта и проверка закончена с отрицательным результатом. Необходимо произвести выбор ТТ, удовлетворяющего требованиям по условию переходных процессов.





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условия функционирования дифференциальных защит шунтирующих реакторов имеют две особенности:

- ✓ высокий уровень токов КЗ в зоне действия, определяемый короткими замыканиями в распределительных устройствах сверхвысокого напряжения электростанций и подстанций;
- ✓ относительно низкий уровень токов включения ШР под рабочее напряжение (порядка нескольких сотен ампер) при наличии в них апериодической составляющей с постоянной времени затухания, достигающей 1 с и более.

Указанные особенности являются причинами насыщения ТТ при КЗ в зоне действия и в режиме включения ШР под рабочее напряжение. Это объясняет необходимость внесения уточнений в приведённую в стандарте ФСК ЕЭС методику выбора уставок продольной дифференциальной защиты ШР, в частности, значения начального тока срабатывания, тока начала торможения и коэффициента торможения, а также обеспечения требуемого быстродействия дифференциальной отсечки.





ז **ו**י

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты:

Кужеков Станислав Лукьянович, Главный инженер НПФ «Квазар» e-mail: kuzhekov@mail.ru

Шурупов Алексей Александрович, зав. отделом подстанционных защит НПП «ЭКРА» e-mail: shurupov_aa@ekra.ru