

# Схема быстродействующей резервной защиты генератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором

Очевидный факт, что короткое замыкание (КЗ) – чрезвычайно пагубное явление в энергосистеме. Оно приводит к серьезному повреждению первичного оборудования и разделению системы на части в ходе нарушения динамической устойчивости.

Минимизировать ущерб от КЗ и сохранить устойчивость при вызванном им возмущении эффективнее всего способна система релейной защиты. При этом, чем выше быстродействие релейной защиты, тем она действеннее.

## Авторы:

Романов Ю.В.,  
Воронов П.И.,  
Нудельман Г.С.

**Н**аименьшее время срабатывания у защит абсолютной селективности, т.к. они выполнены без выдержки времени. Помимо этой основной защиты высоким быстродействием обладает и первая ступень резервной защиты. Благодаря тому, что они работают по разным принципам действия, использование обеих за-

щит позволяет за счет взаимного резервирования обеспечить высокую надежность срабатывания системы защиты в целом. Если отсутствует резервная защита, в случае отказа основной защиты ликвидация КЗ затягивается по меньшей мере на 300 мс.

Рассмотрим систему защиты синхронного генератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором. В качестве основной от КЗ в обмотке статора генератора используется продольная дифференциальная токовая защита. Что касается ее резервирования, оно полноценно только в режимах несимметричных КЗ и с помощью защиты только одного типа – токовой отсечки обратной последовательности без выдержки времени и с зоной действия, не выходящей за пределы блока. При симметричных же повреждениях, составляющие обратной последовательности токов и напряжений отсутствуют, поэтому в этих режимах данная защита неработоспособна.

Все остальные резервные защиты выполняются с выдержками времени, из них быстрее всего срабатывает первая ступень двухступенчатой дистанционной защиты (ДЗ). Зона действия первой ступени ДЗ должна надежно ох-

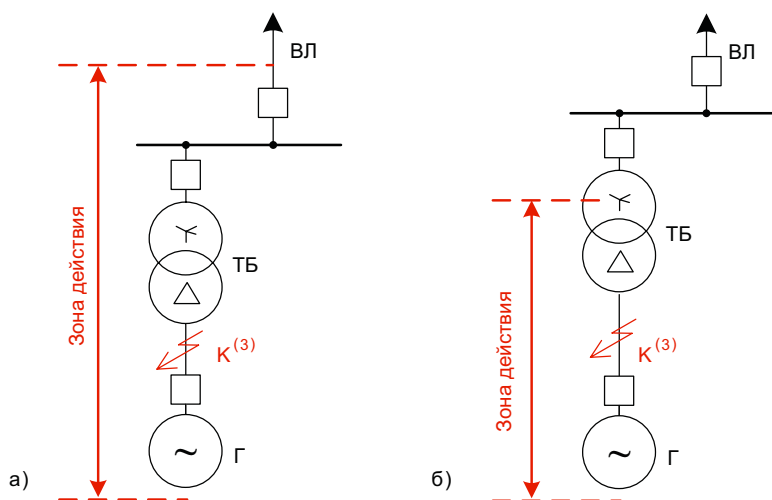


Рис. 1. Зоны действия ступеней ДЗ: а – первой ступени; б – дополнительной ступени

ватывать трансформатор блока (рис. 1,а). Исходя из этого, ее выдержка времени на срабатывание отстраивается от времени действия УРОВ смежных элементов и обычно принимается не менее 0,9 с. Таким образом, в случае вероятного отказа продольной дифференциальной защиты резервная защита генератора не способна быстро ликвидировать симметричные КЗ.

Указанную проблему возможно решить путем добавления к ДЗ еще одной (третьей по счету) ступени с зоной действия, не выходящей за пределы блока (рис. 1,б), и работающей без выдержки времени. Для этой ступени сопротивление срабатывания должно определяться по формуле:

$$Z_{с.з.} = k_{отс} X_{ТБ}, \quad (1)$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки, можно принять равным 0,8;  $X_{ТБ}$  – индуктивное сопротивление трансформатора блока.

Как правило, все реле сопротивления ДЗ генератора выполняются направленными и с круговыми характеристиками срабатывания (кривая 1 на рис. 2). Однако для дополнительной ступени лучше использовать ненаправленные реле (характеристика срабатывания 2 на рис. 2). В противном случае ее чувствительность будет весьма ограниченной из-за малой протяженности зоны действия, которая в 3–4 раза короче зоны действия первой ступени ДЗ.

Очевидно, что ненаправленное реле сопротивления обеспечивает более высокую чувствительность, чем направленное. Однако по мере расширения характеристики срабатывания в третий и четвертый квадрант комплексной плоскости сопротивления повышается вероятность срабатывания защиты в случае потери возбуждения генератора. Несмотря на это, при потере возбуждения дополнительная ступень ДЗ не будет срабатывать ложно, т.к. быстродействующие ступени всегда выполняются с блокировкой при качаниях (БК).

Как показали исследования на динамических моделях, отсутствие выдержки времени у дополнительной ступени ДЗ может привести к ложному срабатыванию, если она выполнена с БК по принципу, связанному с измерением сопротивления. Это вероятно в случае возникновения неисправности цепей напряжения, если неисправность выявляется с некоторой задержкой (рис. 3). Для исключения ложного срабатывания в данной ситуации целесообразно использовать БК по приращению токов прямой и обратной последовательности, работа которой не зависит от цепей напряжения.

Еще одна проблема дополнительной ступени ДЗ связана с малой протяженностью ее зоны действия. Чем короче зона действия, тем большее влияние на работу реле оказывает погрешность измерения комплексного сопротивления. Рассмотрим на примере, как может сказаться погрешность, вызванная насыщением магнитопровода трансформаторов тока (ТТ). На рис. 4 приведены осциллограммы напряжения и тока при трехфазном КЗ внутри обмотки статора генератора. Ток представлен как с искажением из-за насыщения ТТ, так и без искажения.

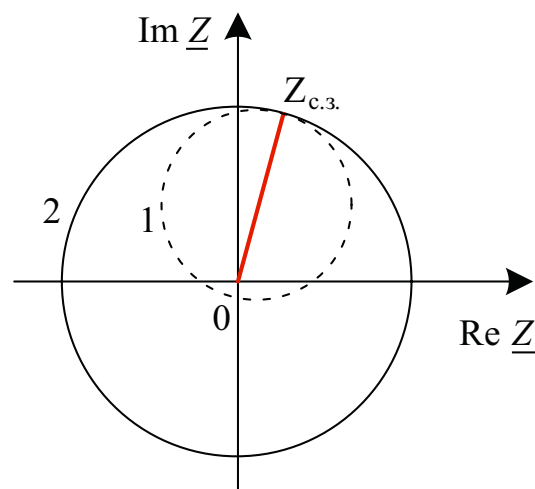


Рис. 2. Характеристика срабатывания реле сопротивления ДЗ

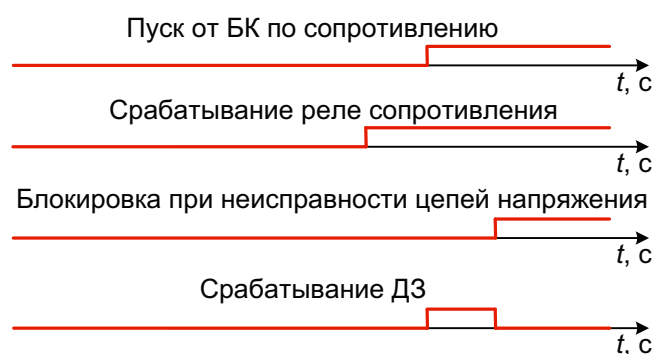


Рис. 3. Иллюстрация ложного срабатывания ДЗ при неисправности цепей напряжения

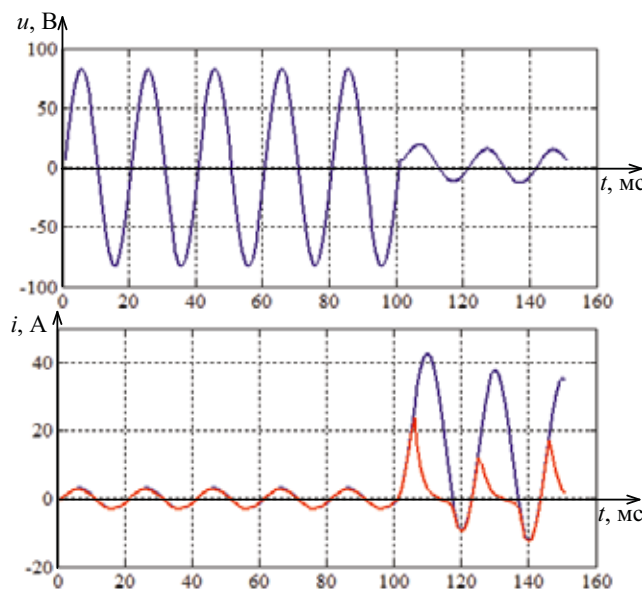


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения трёхфазного КЗ в обмотке статора

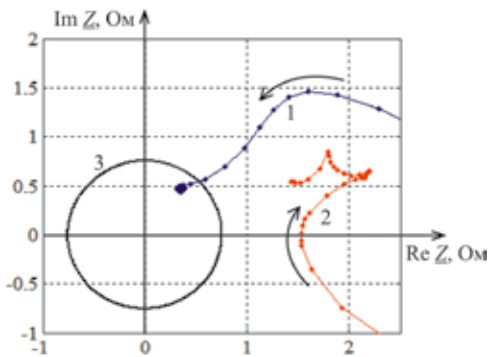


Рис. 5. Годографы замера сопротивления

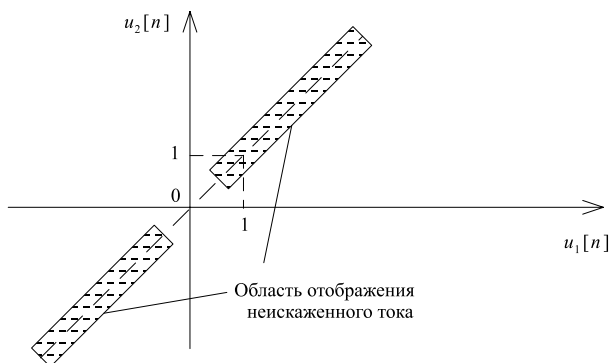


Рис. 6. Плоскость, где выделяются неискаженные значения тока КЗ

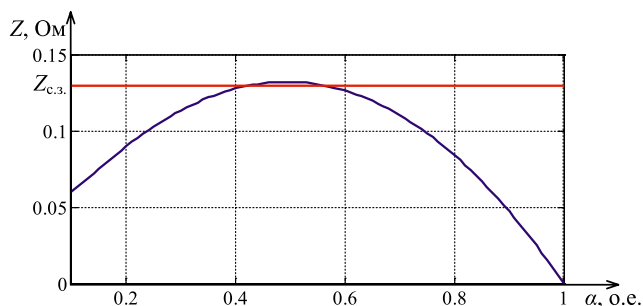


Рис. 7. Зависимость замера сопротивления от доли замкнувшихся витков

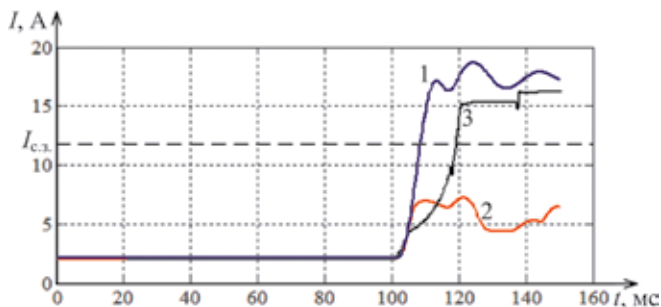


Рис. 8. Результаты фильтрации тока трехфазного КЗ

Поведение замера комплексного сопротивления, полученного с помощью фильтра Фурье, в данном процессе можно наблюдать на рис. 5.

Видим, что в установившемся режиме работы фильтра замер сопротивления, сформированный из неискаженного тока (годограф 1), попадает внутрь области срабатывания реле сопротивления, ограниченной окружностью 3. Замер, полученный по искаженным входным воздействующим величинам (годограф 2), в течение всего наблюдаемого времени переходного процесса пребывает в значительном отдалении от области срабатывания. Рассматриваемое поведение объясняется тем, что насыщение магнитопровода ТТ занижает действующее значение измеряемого тока, что, в свою очередь, завышает кажущееся расстояние до места КЗ. Добиться надежного срабатывания защиты в таких случаях можно путем повышения качества фильтрации, к примеру, за счет применения фильтра, работающего только по участкам правильной трансформации тока. Для выделения участков правильной трансформации существует множество способов, к примеру, описанные в [1] и [2]. Далее рассмотрим идеи, положенные в основу одного из них.

В те короткие интервалы времени, когда магнитопровод ТТ не насыщен, ток КЗ можно довольно точно описать суммой синусоидальной и постоянной составляющих:

$$i[n] = I_m \sin(2\pi f \tau n + \varphi_0) + I_0,$$

где амплитуда синусоиды  $I_m$ , ее начальная фаза  $\varphi_0$  и постоянная составляющая  $I_0$  – неизвестные величины;  $f$  – частота сети, Гц;  $\tau$  – интервал дискретизации, с;  $n$  – дискретное время.

Для такой модели сигнала справедливо равенство:

$$i[n] - (1 + 2 \cos 2\pi f \tau) i[n-1] + (1 + 2 \cos 2\pi f \tau) i[n-2] - i[n-3] = 0.$$

Перепишем данное равенство в виде:

$$i[n] + (1 + 2 \cos 2\pi f \tau) i[n-2] = i[n-3] + (1 + 2 \cos 2\pi f \tau) i[n-1]. \quad (2)$$

Далее возьмем координатную плоскость с отложенными по осям значениями величин, взятых из (2):

$$u_1[n] = i[n] + (1 + 2 \cos 2\pi f \tau) i[n-2],$$

$$u_2[n] = i[n-3] + (1 + 2 \cos 2\pi f \tau) i[n-1].$$

Основная идея способа заключается в том, что отображенный на рассматриваемую плоскость сигнал тока КЗ в моменты правильной трансформации ТТ тяготеет к биссектрисе, разделяющей первый и третий квадрант (см. рис. 6).

Возвращаясь к ДЗ, отметим следующее. Поскольку протяженность зоны действия дополнительной ступени ДЗ небольшая, справедливо поднять вопрос о том, какую часть обмотки статора генератора она охватывает. Качественную оценку степени охвата проведем на примере генератора СВ-1340/150-96 и трансформатора ТДЦ-125000/110. Сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора  $X_g^* = 0,524$  Ом, индуктивное сопротивление трансформатора  $X_{ТБ} = 0,164$  Ом. Определенное по формуле (1) сопротивление срабатывания  $Z_{c.з.}$  составляет 0,13 Ом.

Следует отметить, что по цепям тока ДЗ, согласно ПУЭ, подключается к ТТ со стороны нулевых выводов генератора, а по цепям напряжения – к трансформатору напряжения на линейных выводах. При этом в случае внутренних повреждений генератора замер защиты  $Z$  не соответствует расстоянию до ме-

ста КЗ. Расчетная зависимость  $Z$  от доли замкнувшихся витков обмотки статора, отсчитываемых от нулевых выводов генератора, при трехфазном КЗ приведена на рис. 7. Как видим, в случае КЗ в середине обмотки (а в реальности в части обмотки от середины до нулевых выводов) дополнительная ступень ДЗ может отказать в срабатывании.

Надежного срабатывания защиты при трехфазных КЗ в неохваченной дополнительной ступенью ДЗ зоне можно добиться, если учесть следующую закономерность. Согласно [3], ток КЗ со стороны нулевых выводов возрастает с уменьшением  $\alpha$ . Это объясняется тем, что по мере уменьшения  $\alpha$  индуктивность замкнувшейся части обмотки уменьшается быстрее, чем её ЭДС. Следовательно, недостаточность протяженности зоны действия дополнительной ступени ДЗ можно компенсировать, если в схему защиты включить токовую отсечку с током срабатывания  $I_{с.з.}$ , отстроенным от максимального тока трехфазного КЗ на линейных выводах генератора  $I_{КЗ,макс}^{(3)}$ :

$$I_{с.з.} = k_{отс} I_{КЗ,макс}^{(3)}$$

где  $k_{отс}$  – коэффициент отстройки, можно принять равным 1,2.

Выше отмечалось, что насыщение магнитопровода ТТ приводит к занижению действующих значений периодических составляющих измеряемых токов. Следует добавить, что токовая отсечка из-за этого может отказать в срабатывании.

На рис. 8 приведены результаты выделения действующего значения тока КЗ по рис. 4 с помощью фильтра Фурье. Видим, что выделенное действующее значение искаженного вследствие насыщения тока (кривая 2) намного меньше, чем неискаженного (кривая 1), а также меньше тока срабатывания отсеч-

ки. Здесь же видим, что отказа в срабатывании не происходит, если вместо фильтра Фурье используется фильтр, работающий по участкам правильной трансформации (см. кривую 3).

### ВЫВОДЫ

1. Существующие схемы резервной защиты блока генератор-трансформатор не обеспечивают ликвидацию трехфазных КЗ в обмотке статора генератора без выдержки времени.
2. Схема быстродействующей резервной защиты от трехфазных КЗ может быть построена на основе дополнительной ступени дистанционной защиты и токовой отсечки. При построении схемы защиты следует учитывать особенности работы в условиях переходных процессов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Зиновьев Д.В. Способ определения интервалов однородности электрической величины // Патент РФ на изобретение № 2308137. – 2007. – Б.И. № 28.
2. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Зиновьев Д.В. Способ определения интервалов однородности электрической величины // Патент РФ на изобретение № 2316870. – 2008. – Б.И. № 4.
3. Казовский Е.Я., Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г., Рубисов Г.В. Анормальные режимы работы крупных синхронных машин // Л.: Наука. – 1969.

**Приглашаем принять участие**

**ХІХ ЕЖЕГОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА**



**ЭЛЕКТРО**  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
и ЭНЕРГЕТИКА

**2 - 4**  
МАРТА 2016

**РОСТОВ-НА-ДОНУ**

**ExpoDON**

ООО «Экспо-Дон»  
г. Ростов-на-Дону,  
пер. Сиверса, 1, оф. 508  
т./ф.: (863) 205-42-48, 205-42-38  
моб.: 8-951-8333672, 89185600920  
E-mail: expo-don@aanet.ru  
Сайт: www.expo-don.ru  
Место проведения:  
«Дворец Спорта»

Поддержка:  
Правительство  
Ростовской области  
ТПП РФ, ТПП РО

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА и ЭНЕРГЕТИКА»  
– Электродвигатели, электрические машины и комплектующие;  
трансформаторы и трансформаторные подстанции; источники  
энергии; электростанции, аккумуляторы, блоки питания;  
Электроэнергетические и энергосберегающие технологии;  
альтернативная энергетика; Электростаночное оборудование;  
Высоковольтное и низковольтное оборудование;  
Оборудование связи; системы безопасности, наблюдения;  
пожарная автоматика; Преобразовательная техника;  
Электрощитовое оборудование;  
Электромонтажное оборудование и инструмент;  
Электроизоляционные материалы; аксессуары;  
Электротермическое, отопительное оборудование;  
Метрология; контрольно-измерительные приборы, средства  
автоматизации; Новые технологии в электротехнике и энергетике.  
«ЭЛЕКТРОНИКА и ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»  
– Электронные приборы и оборудование, изделия и материалы.  
Контрольно-измерительные приборы (КИП) и средства  
промышленной автоматизации.  
«КАБЕЛИ и ПРОВОДА» - Кабельная и проводная продукция,  
изделия и материалы. Структурированные кабельные системы,  
Волоконно-оптические линии связи. Приборы контроля;  
«СВЕТОТЕХНИКА» - Системы освещения для промышленных и  
офисных помещений; уличное, наружное, дорожное, аварийное  
освещение; технологии, оборудование, материалы.  
«ТЕПЛОТЕХНИКА» - Отопительное оборудование и технологии,  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.

Ген. интернет спонсор **RusCable.Ru**  
Ген. интернет партнер **elec.ru**  
Ген. информац. партнер **СНЕРТО**