

## ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, С.М. Юдин

Томский политехнический университет

E-mail: vra@tpu.ru

*Выявлены причины увеличения тока небаланса у трансформатора тока нулевой последовательности, охватывающего пучок кабелей с большим рабочим током. Предложены метод и устройство для выявления дефектов, вызывающих повышение тока небаланса на стадии изготовления трансформатора тока нулевой последовательности.*

### **Ключевые слова:**

*Защита от замыканий на землю, трансформатор тока нулевой последовательности, ток небаланса.*

### **Key words:**

*Ground fault protection, zero sequence current transformer, unbalanced current.*

В настоящее время в электроэнергетике довольно интенсивно развивается концепция распределенной генерации, которая реализуется, как правило, на базе газотурбинных агрегатов сравнительно небольшой мощности. В большинстве случаев генераторы таких электростанций присоединяются к сборным шинам распределительных устройств несколькими параллельными кабелями, или как принято называть такое присоединение – пучком кабелей. Такое же конструктивное решение также часто используется при реконструкции электростанций старой постройки и в частности при замене турбин и генераторов. Это объясняется тем, что размещение уже имеющегося вспомогательного оборудования электростанции не позволяет выполнить присоединение генератора жестким шинопроводом.

В практических случаях мощность генераторов, присоединяемых пучком кабелей, составляет от 6 до 32 МВт при номинальном напряжении 6,3 или 10,5 кВ. Соответственно номинальный ток генераторов лежит в пределах 4...6,7 кА.

Одним из обязательных видов защиты, которой должен быть оснащен генератор, является защита от замыканий на землю в обмотке статора генератора. К чувствительности такой защиты предъявляются очень высокие требования. По существующим нормативам защита должна срабатывать при токе нулевой последовательности в цепи генератора не более 5 А. Однако весьма желательно обеспечить по возможности еще более высокую чувствительность, так как при этом и при прочих равных условиях уменьшается зона нечувствительности защиты, примыкающая к нейтрали. Особенно важно повышение чувствительности для случаев, когда присоединенная к генератору внешняя сеть имеет сравнительно небольшой емкостный ток замыкания на землю. Из условия селективности ток срабатывания защиты от замыканий на землю должен отстраиваться от тока, равного сумме собственного емкостного тока генератора и тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности. Собственный емкостный ток генераторов указанной

выше мощности невелик и лежит в пределах примерно от 0,2 до 1,2 А. Поэтому основным резервом для повышения чувствительности защиты является снижение тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности.

В рассматриваемом случае принципиально возможно применение в качестве фильтра нулевой последовательности трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП), через окно магнитопровода которого пропускается весь пучок кабелей. Влияние различных факторов на ток небаланса ТТНП исследовалось в ряде работ [1–3], а наиболее глубоко и тщательно – в работе [1]. Наилучшим при прочих равных условиях является ТТНП, геометрия которого обладает пространственной симметрией, а именно ТТНП, выполненный на тороидальном магнитопроводе с равномерным расположением вторичной обмотки по длине магнитопровода. Такой ТТНП имеет наименьший ток небаланса, вызываемый несимметричным расположением первичных проводников относительно магнитопровода.

Однако может иметь место значительное увеличение тока небаланса из-за несовершенства технологии изготовления магнитопровода и нанесения обмотки. В настоящее время тороидальные магнитопроводы изготавливаются навивкой ленты электротехнической холоднокатаной стали. При этом возможны следующие дефекты при изготовлении, которые могут привести к повышению тока небаланса:

- нарушение изоляционного покрытия ленты электротехнической стали и замыкание полос при навивке;
- неодинаковая плотность укладки витков вторичной обмотки вдоль магнитопровода.

Наличие таких дефектов в виде повышенного тока небаланса может быть обнаружено после монтажа ТТНП и непосредственного измерения тока небаланса при рабочем токе генератора. Если окажется, что ток небаланса превышает допустимое значение, то потребуются его замена с необходимостью остановки генератора и возможно потребует-

ся также перерезка кабелей. Для того чтобы избежать установки ТНП с повышенным током небаланса, в статье предлагается метод выявления дефектов, влияющих на ток небаланса ТНП на стадии его изготовления.

Геометрическая сумма токов пучка кабелей в рабочем режиме равна нулю, так как токи генератора образуют уравновешенную симметричную трехфазную систему. В настоящее время для присоединения генераторов применяется пучок кабелей, как правило, состоящий из одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Поэтому проводники отдельных фаз могут располагаться в окне магнитопровода ТНП произвольным образом. Это обстоятельство, особенно при наличии упомянутых выше дефектов изготовления, и может быть причиной повышенного тока небаланса. Наиболее неблагоприятным является, например, такое расположение кабелей, когда жилы фаз *A* и *C* оказываются у одного края магнитопровода, а у другого края по диаметру – жилы фазы *B*. Пояснение для пучка из шести одножильных кабелей приведено на рис. 1.

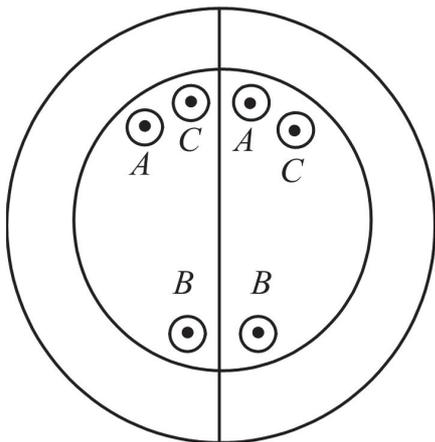


Рис. 1. Неблагоприятное расположение кабелей в окне магнитопровода

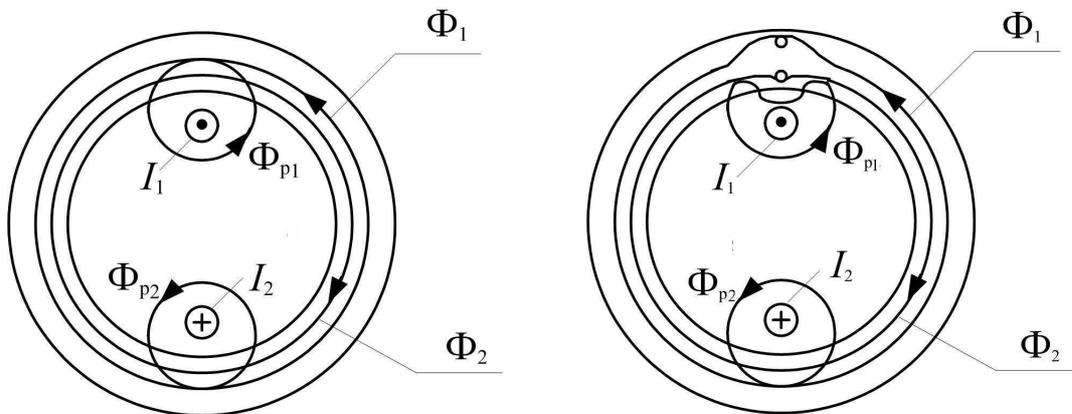


Рис. 3. Влияние замыкания листов стали магнитопровода на распределение магнитных потоков: а) при отсутствии дефектов; б) при замыкании листов трансформаторной стали

При таком расположении токи, протекающие по жилам фаз *A* и *C*, и токи фазы *B* можно заменить эквивалентными двумя равными по величине токами, текущими через окно магнитопровода в противоположных направлениях, что поясняется на векторной диаграмме, приведенной на рис. 2.

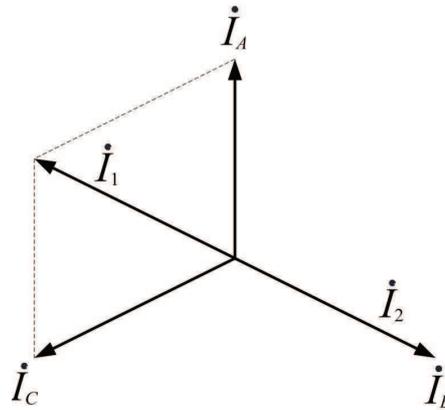


Рис. 2. Векторная диаграмма для пояснения замены трехфазной уравновешенной системы токов двумя токами

На рис. 3 поясняется механизм повышения тока небаланса при наличии дефектов на основе замены действительной системы токов пучка кабелей двумя эквивалентными.

Рис. 3, а соответствует случаю, когда магнитопровод однороден (дефекты отсутствуют), а рис. 3, б, – когда имеются перемкнувшиеся листы, образующие в магнитопроводе замкнутый контур. Основные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , замыкающиеся по магнитопроводу, в обоих случаях находятся в одинаковых условиях, так как при неоднородном магнитопроводе каждый из этих потоков пересекает короткозамкнутый контур в магнитопроводе.

Другая картина имеет место по отношению к потокам рассеяния. При однородном магнитопроводе ЭДС, наводимая потоком рассеяния  $\Phi_{p1}$  в прилегающей к току  $I_1$  зоне витков, компенсируется

примерно такой же ЭДС, наводимой потоком рассеяния  $\Phi_{p2}$  в зоне витков, прилегающих к току  $I_2$ .

При наличии короткозамкнутого контура вблизи одного из токов магнитный поток  $\Phi_{p1}$ , как показано на рис. 3, б, вытесняется из магнитопровода и упомянутой выше взаимной компенсации ЭДС не происходит. Это является причиной возрастания тока небаланса. Влияние короткозамкнутых контуров в магнитопроводе тем больше, чем больше удалены друг от друга линии эквивалентных токов в окне ТТНП.

На основе приведенного выше объяснения влияния неоднородности магнитопровода на ток небаланса следует вполне очевидный метод для проверки трансформаторов тока нулевой последовательности в процессе изготовления. Устройство, выполненное на основе этого метода, схематично показано на рис. 4.

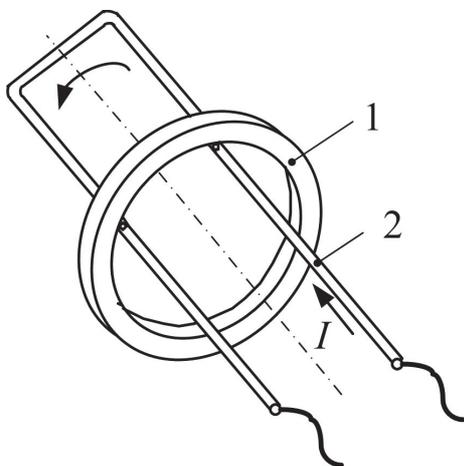


Рис. 4. Схематическое изображение устройства для проверки ТТНП: 1 – ТТНП, 2 – поворачивающаяся петля с током

Достаточно длинная петля на жесткой конструкции, которая может поворачиваться на угол  $360^\circ$ , помещается внутри окна ТТНП, как показано на рис. 4. Расстояние между проводниками петли принимается равным диаметру внутреннего окна ТТНП. При приближении одного из проводников петли к месту, где имеются перемкнувшиеся листы электротехнической стали магнитопровода, наблюдается резкое возрастание тока небаланса. Очевидно также, что будет увеличиваться ток небаланса, если потоки рассеивания, создаваемые токами  $I_1$  и  $I_2$ , будут сцепляться с различным числом витков, что может быть при неравномерной плотности витков вторичной обмотки вдоль магнитопровода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова думка, 1983. – 268 с.
2. Шалин А.И., Хабаров А.М. Небалансы в направленных защитах от замыканий на землю // Официальный сайт компании «Болид». 2013. URL: <http://static.pnpbolid.com/pdf/IV-Conference-2006-15.pdf> (дата обращения: 28.02.2013).

Специальные трансформаторы тока для высокочувствительной защиты генераторов разработаны и изготавливаются в Томском политехническом университете. Внешний вид одного из исполнений трансформатора с диаметром внутреннего окна для пропуска кабелей равным 225 мм показан на рис. 5.

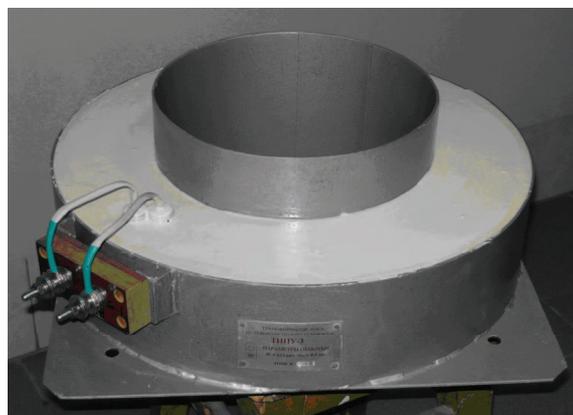


Рис. 5. Трансформатор тока нулевой последовательности с диаметром внутреннего окна 225 мм

Трансформатор помещен в стальной сварной корпус и залит эпоксидным компаундом. Стальной корпус, кроме механической защиты, снижает влияние внешних магнитных полей и при прочих равных условиях дополнительно снижает ток небаланса. Перед окончательной сборкой и заливкой трансформатор подвергается проверке по описанной выше методике. У выпускаемых ТТНП ток небаланса таков, что не препятствует выполнению защиты с первичным током срабатывания 1...3 А.

#### Выводы

1. Повышенный ток небаланса трансформатора тока нулевой последовательности, используемого для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, присоединяемых пучком кабелей, может быть обусловлен замыканием листов электротехнической стали и неравномерной плотностью витков вторичной обмотки по длине магнитопровода.
2. Для выявления дефектов, которые вызывают увеличение тока небаланса, может быть использовано устройство, принцип действия которого основан на замене уравновешенной системы токов пучка кабелей двумя равными токами, протекающими в противоположных направлениях.
3. Щеглов А.И., Горюнов В.А. Защиты от замыканий на землю в сетях 6(10) кВ. Особенности монтажа трансформаторов тока нулевой последовательности // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – Т. 53. – № 5. – С. 68–70.

Поступила 01.03.2013 г.