

циента  $k_S$ , являющегося функцией импульса ЭДУ, требует построения итерационного процесса:

- 1)  $k_S$  принимается равным единице;
- 2) определяется при заданных параметрах и размерах гибких шин  $S_{don}$ ;
- 3) по кривым  $k_S = f\left(\frac{S}{\rho l}\right)$  находится величина  $k'_S$  и повторяется расчет  $S_{don}$ .

Для получения удовлетворительного результата достаточно выполнить две-три итерации по  $k_S$ . Подставим в формулу (1) вместо импульса ЭДУ  $S_{don}$  и определим допустимые токи (токи электродинамической стойкости) по условию сближения фаз при двухфазном КЗ. Определим при указанных токах по КП BUSEF  $Y_{max\ КП}$  и сравним с  $Y_{don}$ . Погрешность  $\Delta Y$  не превышает 10 %. Аналогично можно найти  $S_{don}$  по условию допустимого приближения фаз гибкой ошиновки к заземлённым конструкциям РУ. Поскольку импульс ЭДУ трехфазного КЗ для крайних фаз несколько больше, чем при двухфазном КЗ, в этом случае расчётный импульс ЭДУ определяется при трёхфазном КЗ.

### Литература

1. Сергей, И.И., Стрелок, М.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: Теория и вычислительный эксперимент. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
2. Сергей, И.И., Пономаренко, Е.Г., Самур Ваиль Махмуд. Оценка сближения проводов распределительных устройств электростанций по допустимому импульсу электродинамических усилий // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 5–9.

УДК 621.311.1.014

## КООРДИНАЦИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Половченя А.И., Полегошко О.Р., Шиммель А.С.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент СИЛЮК С.М.

Причинами возникновения переходных процессов могут быть:

- повторные включения и отключение короткозамкнутых сетей;
- атмосферно-климатические воздействия на элементы СЭС;
- асинхронный ход синхронных машин после их выпадения из синхронизма;
- реверсирование асинхронных двигателей;
- асинхронный пуск синхронных двигателей и синхронных компенсаторов;
- внезапные наброски и сбросы нагрузки;
- короткие замыкания в элементах СЭС;
- форсировка возбуждения синхронных машин и гашение их магнитного поля;
- появление несимметрии фазных токов и напряжений через отключение отдельных фаз, несимметричные изменения нагрузки фаз, обрывы фазных проводников и т. п.;
- включение, выключение или переключение источников электрической энергии, трансформаторов, ЛЭП, электропотребителей и других элементов.

Рост уровней токов КЗ предъявляет повышенные требования в отношении электродинамической и термической стойкости элементов электротехнических устройств энергосистем, а также коммутационной способности электрических аппаратов. С целью

уменьшения воздействия токов КЗ на электрооборудование предложены и используются различные методы и средства ограничения токов КЗ. Учитывая специфику развития современных объединенных энергосистем, вопросы устойчивости и надежности их работы, а также технико-экономические характеристики, разрабатываются и исследуются принципиально новые средства токоограничения, позволяющие ограничить не только величину тока КЗ, но и его продолжительность.

Решение указанной задачи возможно: повышением быстродействия традиционной коммутационной аппаратуры; созданием и использованием новых сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов, способных безинерционно, т. е. в течение первого полупериода ограничить и отключить ток КЗ; использованием безинерционных и инерционных токоограничивающих устройств.

Электродинамическое воздействие тока КЗ можно снизить путем использования токоограничивающих коммутационных аппаратов. Таковыми могут быть, например, тиристорные выключатели с принудительной коммутацией, ограничители ударного тока взрывного действия и токоограничивающие предохранители.

Термическое и электродинамическое воздействие тока КЗ можно снизить путем использования безинерционных токоограничивающих устройств (БТУ), таких как реакторы, резонансные токоограничивающие устройства и т. п. В ряде случаев для уменьшения термического воздействия тока КЗ и облегчения работы коммутационной аппаратуры могут быть использованы также инерционные токоограничивающие устройства, например устройство автоматического деления сети или устройство, состоящее из реактора, нормально зашунтированного выключателем.

Для ограничения токов КЗ на электростанциях и в сетях энергосистем используются:

- метод оптимизации структуры и параметров сети (схемные решения);
- метод стационарного или автоматического деления сети;
- применение токоограничивающих устройств;
- оптимизация режима заземления нейтралей электрических сетей.

В качестве средств ограничения токов КЗ соответственно используются или могут быть использованы:

- устройства автоматического деления сети;
- токоограничивающие реакторы (неуправляемые и управляемые, с линейной или с нелинейной характеристикой);
- трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения;
- трансформаторы с повышенным напряжением короткого замыкания;
- безинерционные токоограничивающие устройства различного типа (резонансные, реакторно-вентильные, с сверхпроводящими элементами и т. п.);
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- токоограничивающие резисторы;
- автотрансформаторы, нормально выполненные без третичной обмотки, соединенной в треугольник;
- разземление нейтралей части трансформаторов;
- заземление нейтралей части трансформаторов и автотрансформаторов через реакторы, резисторы или иные токоограничивающие устройства;
- замена на связях распреедустройств различного напряжения автотрансформаторов трансформаторами;
- автоматическое размыкание в аварийных режимах третичных обмоток автотрансформаторов;
- вставки постоянного тока;

– вставки переменного тока непромышленной частоты.

В зависимости от местных условий, требуемой степени ограничения токов при различных видах КЗ, а также от технико-экономических показателей для ограничения токов КЗ в конкретных электроустановках или в конкретных сетях энергосистемы необходимы различные средства токоограничения или их комбинации, дающие наибольший технико-экономический эффект.

Вопрос о координации уровней токов КЗ и параметров электрооборудования энергосистем возникает и решается на четырех этапах:

- при перспективном планировании развития энергосистем;
- при проектировании конкретных электроустановок (электростанций, подстанций, линий электропередачи и т. п.);
- при эксплуатации энергосистем;
- при формулировании технических требований к электрооборудованию, а также при планировании разработки, освоения, выпуска и внедрения новой техники электропромышленностью.

Для каждого из перечисленных этапов характерны свои цели и задачи, объем исходной информации, технические и технико-экономические ограничения, а также последствия принятия того или иного решения. При этом целесообразно стремиться к тому, чтобы при любых принимаемых решениях ток однофазного (и двухфазного КЗ на землю) не превосходил бы тока трехфазного КЗ, скорость восстанавливающегося напряжения не являлась бы определяющим фактором при выборе выключателей, а изоляция фаз и нейтралей трансформаторов не подвергалась бы в режиме КЗ воздействию опасных для нее перенапряжений.

Для координации уровней токов КЗ в эксплуатации целесообразно использовать:

- модернизацию оборудования с целью получения более высоких параметров;
- токоограничивающие реакторы;
- трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения;
- различного рода токоограничивающие устройства;
- отказ от автотрансформаторных связей (исключение автотрансформаторов из схем или замена их соответствующими трансформаторами);
- изменение схемы электроустановки путем переключения отдельных элементов с одной секции (системы шин) распределительного устройства на другую или путем дробления мощности установленных трансформаторов;
- деление сети стационарное (СДС) на секционных, шиносоединительных или линейных выключателях;
- деление сети автоматическое (АДС) на секционных и шиносоединительных выключателях, а также на выключателях автотрансформаторов связи распределительных устройств различных напряжений;
- заземление нейтралей части трансформаторов;
- заземление нейтралей части трансформаторов через резисторы, реакторы или устройства с нелинейными характеристиками;
- кратковременное размыкание третичной обмотки автотрансформаторов при коротких замыканиях, сопровождающихся большими (недопустимыми) токами.

На практике в зависимости от местных условий для ограничения уровней токов КЗ может быть принят один или несколько из перечисленных выше способов. Принимаемое решение должно иметь соответствующее технико-экономическое обоснование, включая анализ возможных режимов и показателей надежности работы электроустановки, условий оперативных переключений в схеме при аварийных ситуациях, а также условий последующего расширения электроустановки и реконструкции распределительных устройств.

Следует подчеркнуть, что стационарное и автоматическое деление сетей в эксплуатации является вынужденным решением в условиях отсутствия эффективных серийно поставляемых электропромышленностью токоограничивающих устройств. Поэтому деление сети должно рассматриваться как внутренний резерв энергосистем.

Для научно обоснованного решения вопроса о координации уровней токов КЗ и параметров оборудования на различных этапах необходима информация о динамике изменения во времени (предыстория, данный момент, перспектива на 5–15 лет) интегральных параметров энергосистем и параметров электрооборудования. Эта информация должна включать в себя как минимум следующие данные: уровни токов однофазного и трехфазного КЗ, кривые распределения уровней токов КЗ по узлам сетей различного напряжения, число и параметры установленных в сетях выключателей, трансформаторов и автотрансформаторов (блочных и связи), генераторов, реакторов и токоограничивающих устройств, число точек стационарного и автоматического деления сети, потребное количество выключателей различных параметров на перспективу при запланированной структуре и параметрах сетей энергосистемы; общую длину линий электропередачи различного напряжения; площадь электроснабжения энергосистемы, плотность нагрузки; плотность сети; плотность генерирующих мощностей; уровни и кривую распределения наибольших скоростей восстанавливающегося напряжения для основных узлов энергосистемы; технико-экономические параметры электрооборудования, включая зависимость стоимости выключателей различного типа от номинального тока отключения и нормированной скорости собственного восстанавливающегося напряжения; коэффициенты распределения выдаваемой мощности электростанций непосредственно в сети различного напряжения. Естественно, что степень полноты исходной информации, ее достоверность, объективный анализ и учет в значительной степени определяют качество принимаемых решений по координации уровней токов КЗ в энергосистемах.

### Литература

1. Неклепаев, Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. – М.: Энергия, 1978.
2. Руководящие указания по расчёту коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания. – М.: МЭИ, 1980.
3. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970.
4. Пивняк, Г.Г. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения. – М.: Энергоиздат, 2003.

УДК 621.314.222.6

## БРОСКИ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

*Радюк В.В., Девятков А.В., Савчук Р.В.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент **ТИШЕЧКИН А.А.**

На трансформаторах мощностью более 7,5 МВА в качестве основной защиты устанавливается продольная дифференциальная токовая защита. Принцип действия защиты аналогичен защите линий электропередачи. Однако особенности трансформатора как объекта защиты приводят к тому, что ток небаланса в дифференциальной защите трансформатора значительно больше, чем в дифференциальных защитах других элементов системы электроснабжения, обусловленных бросками тока намагничивания.

Бросок тока намагничивания возникает при включении трансформатора под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения внешнего КЗ.