

жинно-моторные, пружинно-рычажные) возможности с точки зрения снижения производственных затрат практически исчерпаны. Второе направление – повышение надежности вакуумных выключателей – в основном связано с повышением надежности их приводов, так как надежность камер при современной технологии производства практически безупречна. Однако при сохранении традиционного подхода к проектированию выключателя маловероятно ожидать существенного повышения надежности аппарата и снижения производственных издержек.

Принципиально отличным изделием на рынке вакуумных выключателей явился аппарат у которого в отличие от «классического» вакуумного выключателя с приводом, использующим механизм свободного расцепления, в основе построения привода выключателя ВВ/TEL-10 заложен принцип соосности электромагнитов каждой из фаз и соответствующей вакуумной камеры. В качестве механизма, удерживающего контакты выключателя в замкнутом состоянии, использован и впервые реализован применительно к высоковольтному коммутационному аппарату известный принцип «магнитной защелки». Оптимизация привода по критерию минимума потребляемой мощности в сочетании с конденсаторным принципом управления и малогабаритной вакуумной камерой позволило в конечном итоге создать аппарат, рекордный по своим массогабаритным показателям, коммутационному и механическому ресурсу и не требующий обслуживания в течение всего расчетного срока эксплуатации.

### Литература

1. Евдокунин, Г.А., Тилер, Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). – СПб.: Издательство Сизова М.П., 2000.
2. Электрическая часть станций и подстанций. Учебно-методическое пособие / Мазуркевич В.Н., Румянцев Ю.Г. и др. – Минск: БГПА, 1998.

УДК 621.31

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА МИНИ-ТЭЦ

*Дервоед В.А.*

Вычислительный эксперимент приобретает в последнее время все большую популярность для исследования и прогнозирования процессов и явлений самой различной физической природы во всех областях науки и техники. Этому способствует, с одной стороны, возрастающая сложность подлежащих изучению вопросов, трудность, а часто и невозможность их непосредственного экспериментального исследования; с другой – появление технических средств, в частности персональных ЭВМ (ПЭВМ), позволяющих реализовать достаточно полные математические модели, обеспечивающие получение достоверных результатов расчетным путем [1].

С развитием малой энергетики (когенерации) в Республике Беларуси и увеличением числа генераторов на таких объектах, как промышленные и сельскохозяйственные предприятия, больницы, массивы коттеджной застройки, поселки в сельской местности, котельные и другие предприятия ЖКХ становится актуальным вопрос об изучении работы генераторов относительно малой мощности параллельно с сетями энергосистемы, а также в автономном режиме.

Необходимость математического моделирования обусловлено тем, что, во-первых, время электромагнитных переходных процессов в маломощных генераторах (0,5–1 с) соизмеримо со временем срабатывания некоторых защит генератора и во-

вторых, к шинам генераторов в большинстве случаев подключены асинхронные электродвигатели, мощность которых соизмерима с мощностью генераторов и расчет переходных процессов при условии неизменной частоты вращения генератора может привести к значительной погрешности [2].

Рассмотрим на примере перевод котельной в мини-ТЭЦ с установкой на ней синхронного генератора БГ-200 электрической мощностью 200 кВт (линейное номинальное напряжение 0,4 кВ). Принимаем расчетную электрическую мощность потребителей котельной 160 кВт, с учетом, что на котельной установлен сетевой насос, вращаемый асинхронным электродвигателем 4AM280S4Y3, номинальной мощностью 110 кВт (коэффициент загрузки принимаем равным единице). Оставшаяся комплексная активно-индуктивная нагрузка котельной составляет 50 кВт и 37,5 квар (для  $\cos\varphi = 0,8$  [3]) соответственно.

Для математического моделирования использована программа GEN, составленная доктором технических наук, профессором Новашем В.И.

Узел нагрузки программы GEN (рисунок 1) содержит синхронный генератор, эквивалентный короткозамкнутый асинхронный двигатель, стационарную активно-индуктивную нагрузку в виде симметричной трехфазной цепи. Узел нагрузки связан с энергосистемой конечной мощности, представленной симметричной системой ЭДС и сопротивлением связи прямой последовательности.

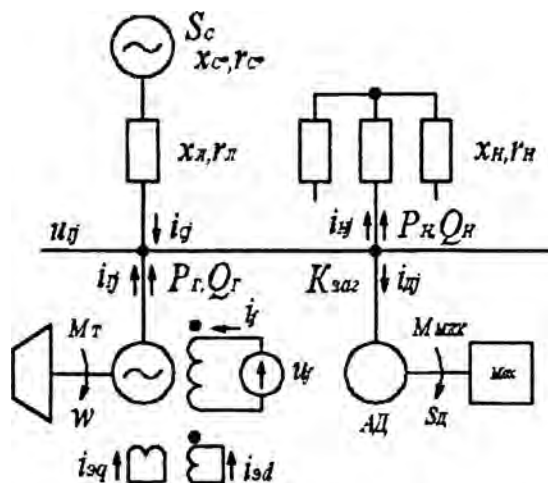


Рисунок 1. Узел нагрузки с синхронным генератором

Генератор описан полными уравнениями, отражающими наличие на роторе, кроме контура возбуждения, эквивалентных демпферных контуров в продольной и поперечной осях с учетом насыщения по пути основного магнитного потока. Эквивалентный двигатель описан аналогичными уравнениями, при этом учтена симметрия ротора, насыщение не учитывается.

Математическая модель узла нагрузки содержит дифференциальные уравнения ЭДС и падений напряжений в контурах ротора и статора генератора, ротора и статора двигателя, уравнения движения роторов генератора и двигателя, уравнения равновесия ЭДС и падений напряжения в контурах внешней системы.

Система алгебраических уравнений содержит уравнения, связывающие потокосцепления контуров с токами в них, а также уравнения баланса токов в узлах схемы.

Модель также учитывает управляющие воздействия со стороны АРВ и АРЧВ генератора. Момент сопротивления механизма эквивалентного электродвигателя определяется в предположении вентиляторной характеристики механизма.

Для исследования устойчивой работы генератора была смоделирована следующая ситуация: отключение линии 110 кВ питающей понижающую подстанцию 110/10 кВ, с последующим включением линии устройствами АПВ через 0,5 с. При отключении линии питающей подстанцию 110/10 кВ (которая в свою очередь питает трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ котельной) генератор отделяется от энергосистемы со всеми нагрузками, подключенными к фидерам подстанции 110/10 кВ. Суммарная мощность этих нагрузок (в данном случае принимаем 10 МВА) намного превышает мощность генератора. Возникает внезапный наброс мощности на генератор, ток статора возрастает, напряжение и частота тока будут снижаться.

На рисунке 2 представлен результат расчета в графической форме.

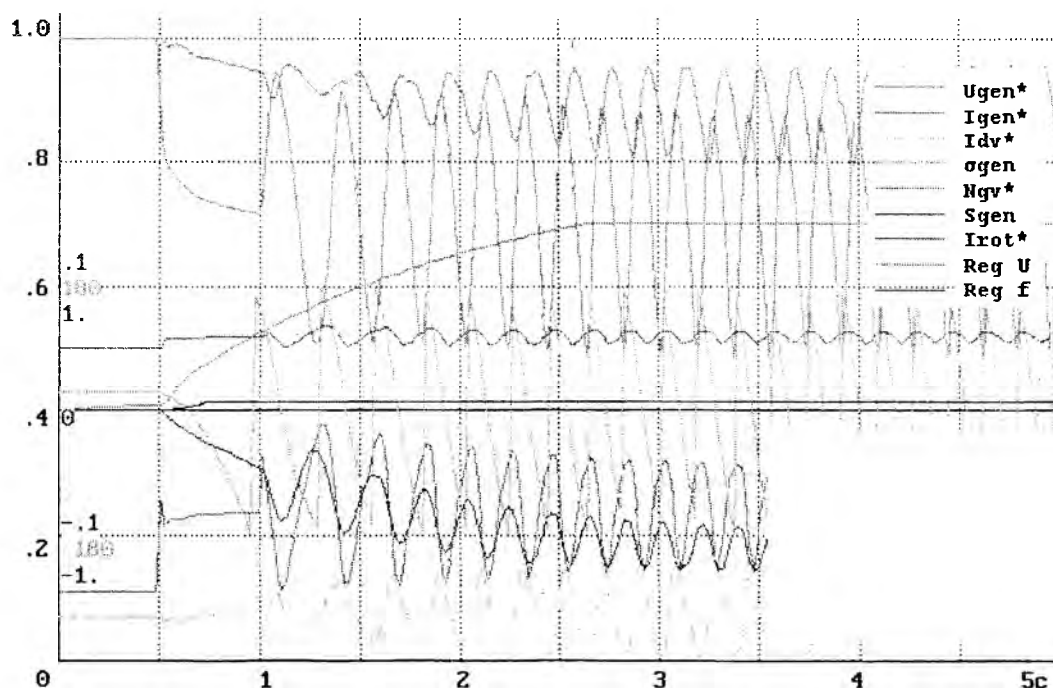


Рисунок 2

Как видно из рисунка 2, когда отключившаяся линия включится от действия АПВ, произойдет несинхронное подключение продолжающего работать генератора к энергосистеме с невозстанавливаемым нарушением синхронизма. Ток несинхронного включения достигает 1 000–1 400 А.

Данный результат может быть полезен при выборе защит и проверке их чувствительности, согласования защитных характеристик по картам селективности, уточнении параметров делительной защиты генератора и т. д.

#### Выводы

1. Математическое моделирование способствует практическому освоению методов анализа электромагнитных переходных процессов электроэнергетических систем от простейшей трехфазной цепи до комплексного моделирования сложных систем.

2. Результаты математического моделирования могут использоваться для исследования и прогнозирования процессов, происходящих в различных элементах электроэнергетических систем.

3. Математическое моделирование позволяет уточнять токи КЗ рассчитанные аналитическим методом (ГОСТ 28249-93) необходимые для выбора и проверки электрооборудования по условиям КЗ, для выбора коммутационных аппаратов, уставок релейной защиты и заземляющих устройств; для проверки чувствительности защит, со-

гласования защитных характеристик по картам селективности и т. д. при проектировании малых электростанций и систем электроснабжения.

### Литература

1. Романюк, Ф.А., Новаш, В.И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.
2. Мелешкин, Г.А. Судовые синхронные генераторы с автоматическим регулированием напряжения. – Л.: Судпромиздат, 1962. – 276 с.
3. Радкевич, В.Н. Проектирование систем электроснабжения: Учеб. пособие. – Минск: НПО «ПИОН», 2001. – 292 с.
4. Новаш, В.И. Тексты лекций по курсу «Теоретические основы автоматизации электрической части станций и подстанций». Ч. 1. и ч. 2. – Минск: БГПА, 1992.
5. Толшин, В.И. Устойчивость параллельной работы дизель-генераторов. – Л.: Машиностроение, 1970. – 200 с.
6. Веретенников, Л.П. Моделирование, вычислительная техника и переходные процессы в судовых электроэнергетических системах. – Л.: Судостроение, 1964. – 384 с.
7. Таганов, С.И. Инженерные расчеты переходных процессов в судовых электростанциях. – Л.: Судостроение, 1970. – 136 с.

УДК 621.316.5

## КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В МАСЛЕ

*Гринюк Д.С., Григореня А.А.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент РЖЕВСКАЯ С.П.

Измерение угла диэлектрических потерь является наиболее распространённым методом обнаружения общего ухудшения состояния диэлектрика. Старение изоляции, сопровождающееся её химическим разложением, деструкцией или расслоением, увлажнение изоляции, появление в ней большого числа газовых включений всегда приводят к росту диэлектрических потерь и могут быть обнаружены измерением  $\operatorname{tg} \delta$ .

Для объектов, обладающих большой ёмкостью измерение  $\operatorname{tg} \delta$  позволяет обнаружить такие дефекты в изоляции, которые захватывают значительную часть её объёма. Сосредоточенные дефекты, за исключением сильно развитых, на величину  $\operatorname{tg} \delta$  практически не влияют. Если в небольшом объёме изоляция (допустим, 2–3 % общего объёма)  $\operatorname{tg} \delta$  возрос в 3–5 раз, то измеряемое значение  $\operatorname{tg} \delta$  возрастает только на 6–15 %, что не даёт основания для вывода об ухудшении состояния изоляции.

В объёмах небольшой ёмкости (трансформаторы тока, вводы) величина  $\operatorname{tg} \delta$  заметно меняется и при развитии местных дефектов.

Наличие газовых включений в изоляции можно обнаружить по виду зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от величины приложенного напряжения. При некотором напряжении в воздушных включениях возникает ионизация, что сопровождается ростом потерь и  $\operatorname{tg} \delta$ .

$\operatorname{tg} \delta$  зависит от  $\omega$ . Эту зависимость, а также зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от температуры тоже можно использовать для оценки состояния изоляции.

Измерение диэлектрических потерь при профилактических испытаниях осуществляется с помощью высоковольтных мостов или ваттметровых схем измерения. В условиях эксплуатации наиболее широко распространены малогабаритные высоковольтные мосты Р5026, Р-595 (рабочее напряжение 5–10 кВ). Измерения могут проводиться по нормальной или перевёрнутой схеме.