

ниям удовлетворяет распространенный в энергосистемах республики ПТК «Сириус» и другие.

Далее стоит задача выбора рационального пути расчета математического ожидания и дисперсий потоков мощности по ветвям сети.

Один из вариантов определения математических ожиданий потоков мощности по ветвям сети – это расчет режима для каждого телеизмерения, полученного по узлам схемы, и из полученных значений потоков мощности по ветвям как среднее определить математические ожидания по ветвям сети. При этом в каждом расчете режима определяются поэлементные потери мощности и далее дискретным путем, как сумма, рассчитываются потери энергии.

Следующий вариант – это проведение расчетов установившихся режимов приложении в узлах сети математических ожиданий узловых мощностей  $M_p$ ,  $M_q$ . Можно сравнить значения по математическим ожиданиям потоков мощности, полученные этими способами.

В энергосистеме имеет место приборный учет энергии и поэтому потери могут быть определены как сальдо показаний счетчиков поступления электроэнергии в сеть и отпуска ее из сети. Потери электроэнергии должны определяться для каждого структурного подразделения энергосистемы, а в задаче технического учета энергии – и для каждой ступени номинального напряжения для получения структурно-балансовой модели сети.

Представляет интерес, параллельно с замерах энергии и определением потерь как сальдо показаний счетчиков, проведение расчетов потерь энергии по вышеописанной вероятностной методике (выражения (1)–(3)) и на основе расчетов режимов на каждом шаге телеизмерений узловых мощностей  $p_i(t)$ ,  $q_i(t)$ .

Заключение о целесообразности того или иного варианта определения вероятностных характеристик и о точности методики определения потерь может быть дано на основе их программной реализации и проведения достаточного объема расчетов. При этом должны учитываться постоянные потери, их зависимость от напряжения,  $t^\circ$  и др.

### Литература

1. Гурский С.К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике. – Минск: Наука и техника, 1977. – 368 с.

УДК 621.311

## РАСЧЕТЫ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Кунцевич А.И.

Научный руководитель – канд. техн. наук ЗОЛОТОЙ А.А.

Расчёт и анализ электромагнитных переходных процессов в электрических сетях энергосистем, вызванных короткими замыканиями, является сложной научно-практической задачей, успешное решение которой, зависит от правильного построения математической модели исследуемой электрической сети. В самом общем виде электрическую сеть для анализа электромагнитных переходных процессов математически можно представить в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений описывающих поведение всех её элементов (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, нагрузок и т. д.). Непосредственное решение полной системы дифференциально-алгебраических уравнений описывающей поведение элементов электрической

сети в наиболее общем случае электромагнитного переходного процесса на практике невозможно из-за её высокого порядка, сложности и требования массы исходной информации, которая зависит от деталей исполнения конкретных образцов электрооборудования и имеется только в конструкторской документации предприятий изготовителей. Однако постановки конкретных практических задач позволяют принимать ряд допущений и упрощений, дающих возможность переходить от общей математической модели решаемой задачи к более частным, упрощённым моделям, которые могут быть обчислены.

Электромагнитные переходные процессы в электрических цепях со статическими элементами подробно излагаются в курсе «Теоретические основы электротехники». Расчёты электромагнитных переходных процессов в электрических сетях реальных энергосистем серьёзно осложняются наличием вращающихся электрических машин. Непрерывное изменение взаимной индукции между обмотками статора и ротора добавляет в дифференциальные уравнения переходного процесса, периодически изменяющиеся во времени собственную и взаимную индуктивности, зависящие от положения ротора относительно обмоток статора. Поэтому дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитный переходный процесс даже без учёта насыщения магнитной системы вращающейся машины, становятся нелинейными, и для них не может быть найдено общее решение.

Дифференциальные уравнения равновесия ЭДС и падений напряжений синхронной машины с продольной и поперечной демпферными обмотками можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} u_{\eta} &= -\frac{d\Psi_{\eta}}{dt} - r_{\eta}i_{\eta} \quad (\eta = A, B, C); \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_j}{dt} + r_j i_j \quad (j = 1d, 1q), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $r$ ,  $r_f$ ,  $r_j$  – активные сопротивления соответственно контуров каждой фазы, цепи возбуждения и демпферных обмоток;

$\Psi_{\eta}$ ,  $\Psi_f$ ,  $\Psi_j$  – результирующие потокосцепления соответствующих обмоток (включая потокосцепления рассеяния).

Поскольку поперечная демпферная обмотка располагается перпендикулярно к обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке, магнитная связь между ними отсутствует ( $M_{f1q} = M_{1d1q} = 0$ ). Раскрыв выражения для потокосцеплений, получим:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + M_{A1d} i_{1d} + M_{A1q} i_{1q}; \\ \Psi_B &= M_{AB} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + M_{B1d} i_{1d} + M_{B1q} i_{1q}; \\ \Psi_C &= M_{CA} i_C + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + M_{C1d} i_{1d} + M_{C1q} i_{1q}; \\ \Psi_f &= M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f + M_{f1d} i_{1d} + 0; \\ \Psi_{1d} &= M_{1dA} i_A + M_{1dB} i_B + M_{1dC} i_C + M_{1df} i_f + L_{1d} i_{1d} + 0; \\ \Psi_{1q} &= M_{1qA} i_A + M_{1qB} i_B + M_{1qC} i_C + 0 + 0 + L_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На практике, определение токов короткого замыкания в электрических сетях и их составляющих обычно производится для следующих целей: выбора силовых электрических аппаратов (выключателей, разъединителей, отделителей, реакторов, трансформаторов тока и т. п.) при проектировании электрической части электростанций и под-

станций; определения чувствительности и уставок срабатывания релейных защит и системной автоматики; разработки схемно-технических решений по ограничению уровней токов короткого замыкания в нормальных схемах электрических сетей; расчётов динамической устойчивости электроэнергетических систем.

Постановка практической задачи формулируется в зависимости от цели её решения и определяет допустимую точность представления электрооборудования при моделировании его поведения в условиях электромагнитного переходного процесса.

В качестве исходной для расчёта информации обычно имеется полная схема электрических соединений сети с параметрами электрооборудования, на которой обозначаются места и виды повреждений. Кроме того, имеется информация о доаварийном режиме, чаще всего полученная из результатов расчёта предшествующего повреждению установившегося режима.

При выборе электрических аппаратов, для проверок по условиям отключающей и включающей способности, электродинамической и термической стойкости требуется определять значения ударных токов, изменения во времени полных токов коротких замыканий, их периодических и аperiodических составляющих. Источники питания (синхронные генераторы, блоки генератор – трансформатор, электрические станции, части энергосистемы) в зависимости от конкретных требований могут быть представлены упрощённо:

- Трёхфазная симметричная система «бесконечной» мощности при моделировании электромагнитных переходных процессов представляется значениями неизменных напряжения и частоты.

- Удалённая трёхфазная симметричная система конечной мощности задается действующими значениями и начальными фазами ЭДС, активными и индуктивными сопротивлениями прямой и нулевой последовательностей. Для правильного моделирования режимов коротких замыканий на землю в системах с глухо заземленными нейтралью, в цепь заземления нейтрали источника вводится активное сопротивление и индуктивность нулевой последовательности.

- Математическими моделями, отражающими конструктивное исполнение источников.

- Электрооборудование расположенное в непосредственной близости к месту повреждения при моделировании электромагнитных переходных процессов необходимо представлять собственными математическими моделями:

- генераторы и двигатели в фазных координатах представляются полными уравнениями контуров, учитывающими активные сопротивления, магнитную и электрическую несимметрию ротора, демпферные обмотки в продольной и поперечной осях. Короткозамкнутые асинхронные двигатели отличается от синхронных отсутствием контура возбуждения и симметричной магнитной системой;

- силовые трансформаторы моделируются дифференциальными уравнениями равновесия ЭДС и МДС каждой из обмоток фазы.

Для определения уставок срабатывания релейных защит и автоматики, требуются значения полных токов коротких замыканий, остаточных напряжений и токов нулевой последовательности для обнаружения замыканий на землю. Указанные параметры электромагнитных переходных процессов в условиях эксплуатации и проектирования электроэнергетических систем допускается определять с использованием приведенных выше упрощений общей математической модели энергосистем.

При разработке нормальных схем эксплуатации электрических сетей контролируются уровни ударных токов и полных токов коротких замыканий в момент размыкания дугогасительных контактов выключателей. В данном случае, для нахождения контролируемых величин применяются подходы использующие метод спрямленных ха-

характеристик разработанный при дальнейшем упрощении общей математической модели энергосистем. Данный метод основан на замещении активных элементов электрической сети (генераторов, обобщённых нагрузок) в каждый момент времени переходного процесса некоторой неизменной ЭДС и реактивным сопротивлением, не зависящими от удалённости места повреждения. Пассивные элементы электрической сети (трансформаторы, реакторы, линии электропередачи и т. д.) представляются в схеме замещения постоянными сопротивлениями.

Для анализа динамической устойчивости электрических систем обычно требуется вычисление сопротивлений шунтов при разных видах и местах несимметричных повреждений в электрических сетях. Расчёты динамической устойчивости базируются на решении дифференциальных уравнений относительно движения роторов параллельно работающих синхронных машин в пространстве. При этом к системе дифференциальных уравнений (1) добавляются уравнения, характеризующие электромеханические свойства вращающихся электрических машин:

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \frac{1}{J\omega_0} (M_m - M_{эл}), \\ \frac{d\delta}{dt} &= \omega_0(1 + s), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $s$  – скольжение;

$J$  – момент инерции;

$M_m$  – вращающий момент турбины;

$M_{эл}$  – электромагнитный момент на валу электрической машины;

$\delta$  – угол положения ротора.

Сопротивления шунтов, которыми представляются несимметричные повреждения в электрических системах при анализе электромеханических переходных процессов, могут находиться при упрощённом представлении электрооборудования в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей, как показано для определения контролируемых электрических параметров при разработке нормальных схем эксплуатации электрических сетей.

Рассмотрим простейший пример. Трансформатор марки ТМН-1600/35 питается от системы бесконечной мощности. От трансформатора отходит одноцепная ВЛ, выполненная проводом А-50. На расстоянии 3 км от трансформатора произошло трехфазное короткое замыкание. Требуется определить ток короткого замыкания, протекающий в первичной обмотке трансформатора.

Каталожные данные провода А-50:

$$r_0 = 0,588 \text{ Ом/км}; \quad x_0 = 0,355 \text{ Ом/км.}$$

Каталожные данные трансформатора ТМН-1600/35:

$$U_{ВН} = 35 \text{ кВ}; \quad U_{НН} = 6,3 \text{ кВ}; \quad r_T = 11,2 \text{ Ом}; \quad x_T = 49,2 \text{ Ом.}$$

Режим работы двухобмоточного трансформатора описывается дифференциальными уравнениями ЭДС первичной и вторичной обмоток. Для одной фазы двухобмоточного трансформатора можно записать:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1; \\ 0 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + u_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Электрические процессы в воздушных и кабельных линиях в общем случае описываются уравнениями вида:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= i_A r_A + L_A \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{AC} \frac{di_C}{dt}; \\ u_B &= i_B r_B + L_B \frac{di_B}{dt} + M_{BA} \frac{di_A}{dt} + M_{BC} \frac{di_C}{dt}; \\ u_C &= i_C r_C + L_C \frac{di_C}{dt} + M_{CA} \frac{di_A}{dt} + M_{CB} \frac{di_B}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Выполнив простые преобразования систем (4) и (5), получаем простейшее дифференциальное уравнение:

$$U_{BH} \sin(\omega t) = r_k i(t) + L_k \frac{di(t)}{dt}, \quad (6)$$

где  $r_k$  – активное сопротивление контура;

$L_k$  – индуктивность контура.

Уравнение (6) легко приводится к форме Коши:

$$\frac{dy(x)}{dx} = f(x, y(x)), \quad (7)$$

и может быть решено численно, например, методом Эйлера.

Решением уравнения (7) для данного примера является график изменения тока короткого замыкания в первичной обмотке трансформатора за время  $t = 0,1$  с. представленный на рисунке 1.

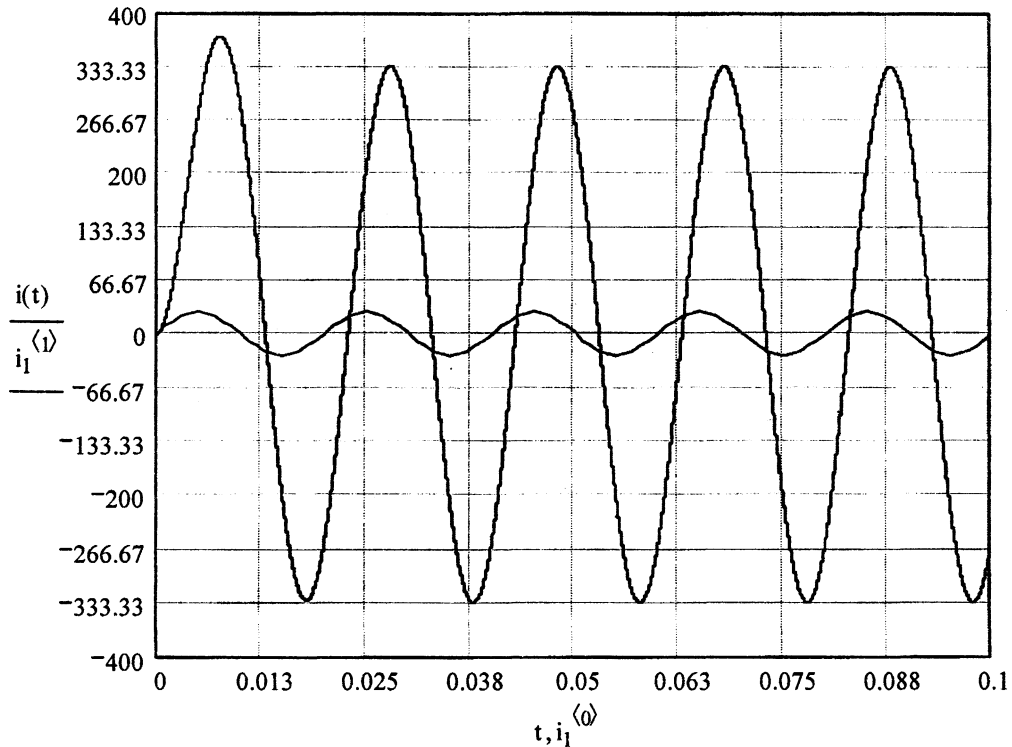


Рис. 1. Изменение токов в первичной обмотке трансформатора во времени:  
1 – ток в режиме короткого замыкания; 2 – ток в доаварийном режиме

Несимметричные короткие замыкания исследуются с применением метода симметричных составляющих. При этом, составляются и решаются системы дифференциальных уравнений для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

### Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.–Л.: Энергия, 1964.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1. – М.–Л.; Энергия, 1964.
4. Романюк Ф.А., Новаш В.И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Минск: ВУЗ-Юнити, 1998.
5. Маркович И.М. Режимы энергетических систем. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.

УДК 621.311

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Лагун Н.А.

Научный руководитель – МЫШКОВЕЦ Е.В.

Экономичность работы электрической системы в значительной степени характеризуется потерями мощности и энергии в электрических сетях. Один из путей снижения потерь мощности и энергии основан на организации рационального регулирования потоков мощности в электрических сетях путем соответствующего выбора регулирующих и компенсирующих устройств [1].

Для улучшения потокораспределения в замкнутых сетях используют следующие методы:

*Перераспределение генерируемой мощности между электростанциями [2].*

Наиболее выгодное распределение мощностей в энергосистеме сводится к загрузке их активной и реактивной мощностью таким образом, чтобы был обеспечен минимум стоимости топлива, расходуемого тепловыми электрическими станциями для покрытия полезных активных нагрузок подстанции и потерь активной мощности, обусловленных протеканием активных и реактивных мощностей.

Данный метод не требует дополнительных капитальных затрат и поэтому является основным. Однако такой способ управления потоками активной мощности не позволяет эффективно оптимизировать потокораспределение в сложнзамкнутых сетях.

*Частичное размыкание сети.*

Распределительные электрические сети 35–110 кВ часто выполняются по замкнутой схеме, но работают они в разомкнутом режиме. Это делается с целью снижения токов короткого замыкания в сети и во избежание уравнильных перетоков между сетями 35–110 кВ и параллельными им сетями более высокого напряжения.

*Настройка сети на однородную.*

Производится с помощью устройств продольной компенсации или реакторов продольного включения. Эффект достигается за счет снижения неоднородности сети, при этом естественное распределение мощностей приближается к экономичному [2].

*Оптимизация режим работы сети с помощью трансформаторных устройств управления потоками мощности.*

Экономичный режим замкнутой сети можно получить, осуществив принудительное распределение мощностей путем включения в контур ЭДС. Продольная ЭДС может быть создана с помощью ответвлений трансформаторов связи, включенных в контур, а поперечная или продольно-поперечная – с применением вольтодобавочных трансформаторов [1]. Для управления параметрами электропередач применяются специальные фазорегулирующие устройства и специальные схемы коммутации, которые,