

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ SIMULINK РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

АСИЕВ А.Т.

izvestiva@ktu.aknet.kg

Исследован режим короткого замыкания трансформаторов автономных электроэнергетических систем в пакете Simulink.

Эксплуатация АЭС для электроснабжения потребителей электроэнергии показала свою экономическую эффективность, но вместе с тем и указала на необходимость серьезного исследования процессов, происходящих при коротких замыканиях (КЗ) в системе. Остро стоит этот вопрос для АЭС с электроприводами мощностью несколько сотен киловатт и высоковольтной частью. Как правило, в подобных силовых сетях электроприводы мощностью более 200-300 кВт получают питание непосредственно от шин главного распределительного щита напряжением 6 кВ, а потребители меньшей мощности – через распределительные понижающие трансформаторы с напряжением вторичной обмотки 0,4 кВ. Одной из особенностей таких электроэнергетических систем считается соизмеримость мощности распределительных трансформаторов с мощностью источников электроэнергии [2].

Важной задачей является проверка чувствительности защиты к дуговым коротким замыканиям в цепи вторичной обмотки трансформатора, т.к. вносимое в схему короткого замыкания сопротивление короткого замыкания трансформатора плюс активное сопротивление дуги приводят к сильному снижению тока аварийного участка по сравнению с токами металлического КЗ. Не менее важным следует считать исследование переходного режима дугового КЗ для проверки надежности электроснабжения неповрежденных участков АЭС, особенно при минимальном числе подключенных источников. Последнее имеет большое значение для безопасности электрооборудования [2].

Стандарт [7] указывает на необходимость проверки чувствительности защиты к токам дугового КЗ, однако не регламентирует порядок учета сопротивления дуги при определении токов КЗ. Стандарт, [6] хотя и устанавливает методы расчета и моделирования переходных процессов в режиме КЗ, но, к сожалению, не дает рекомендаций по режиму дугового КЗ.

Трудность учета электрической дуги состоит в нелинейной зависимости активного сопротивления дуги от проходящего тока и других факторов. Существует ряд методик для аналитических расчетов, разработанных в результате проведенных опытов в береговых сетях, и нашедших отражение в [3, 5, 8]. Документы [3, 8] не распространяются на АЭС и лишены гибкости для использования в компьютерных моделях. Итоги большой работы по исследованию режима дугового КЗ в автономных электроэнергетических сетях приведены в [4]. В работе показано, что падение напряжения на электрической дуге в режиме КЗ в сетях низкого напряжения не превышает 50-75% номинального напряжения сети. Эта характеристика может быть положена в основу создания компьютерной модели дуги для исследования переходных режимов АЭС.

Типовой участок судовой сети в режиме КЗ упрощенно представлен на рис.1.

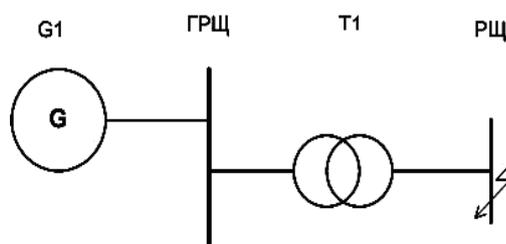


Рис. 1. Типовой участок АЭС с распределительным трансформатором

Без учета токов подпитки от электродвигателей и намагничивания трансформатора участок цепи до генератора может быть представлен эквивалентной электрической схемой (рис. 2).

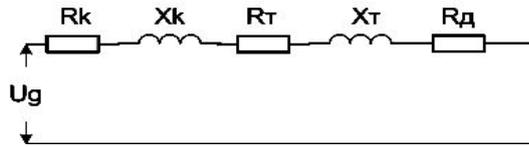


Рис.2. Эквивалентная схема участка КЗ

Сопротивления R_k и X_k представляют собой сумму активных и реактивных сопротивлений таких элементов сети как кабели, шины, трансформаторы тока и переходные сопротивления. Сопротивления R_t , X_t являются сопротивлениями короткого замыкания трансформатора. Электрическая дуга отображена на схеме активным нелинейным сопротивлением R_d .

Приведенная эквивалентная схема может быть приведена к цепи из последовательно соединенных активных и индуктивного сопротивлений (рис. 3).

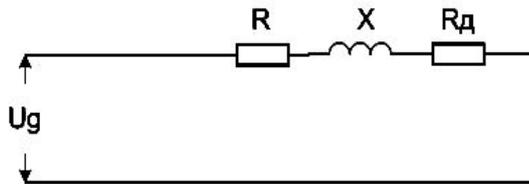


Рис.3. Упрощенная эквивалентная схема КЗ

$$\begin{cases} R = R_k + R_t; \\ X = X_k + X_t, \end{cases}$$

Уравнения активно-индуктивной линии в осях dq получены в [1] и выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + X \frac{d}{dt} i_d - (1+s)Xi_q; \\ u_q = Ri_q + X \frac{d}{dt} i_q + (1+s)Xi_d, \end{cases} \quad (1)$$

где u_d , u_q , i_d , i_q – проекции вектора напряжения u и тока i на оси d и q соответственно, s – скольжение генератора.

Такая характеристика дуги как падение напряжения, как упоминалось ранее, на уровне 50-75% номинального значения сети вне зависимости от различных факторов позволяет записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}; \\ u_d = ku, \end{cases} \quad (2)$$

где u – напряжение сети; u_d – падение напряжения на дуге; k – коэффициент, определяющий соотношение падения напряжения на дуге и номинального сетевого напряжения.

Составляющие падения напряжения на дуге:

$$\begin{cases} u_d = R_d i_d; \\ u_q = R_d i_q, \end{cases} \quad (3)$$

После подстановки (3) в (2) и выразив R_d получим:

$$R_d = \frac{ku}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}}. \quad (4)$$

Таким образом, полная компьютерная модель участка АЭС с распределительным трансформатором в режиме дугового КЗ во вторичной обмотке включает:

- модель генераторного агрегата, построение которой подробно описано в [1],
- модель силовой кабельной линии,
- модель силового трансформатора,

- модель электрической дуги.

Для проверки соответствия компьютерной модели экспериментальным данным, приведенным в [3], с учетом изложенных соображений, построена модель в пакете Simulink (рис. 4).

В структуру блока помещен элемент Step, необходимый для задания момента начала дугового КЗ.

Содержание блока ARC, представляющего собой модель нелинейного сопротивления дуги, показано на рис.5.

Стандарт [3] приводит экспериментальные данные дугового КЗ во вторичной цепи трансформатора. Результаты экспериментов даны в виде графиков зависимости сопротивления дуги от длины кабеля «низкой» стороны трансформатора. На рис. 6, 7 пунктиром изображены кривые, соответствующие экспериментальным данным из [3]. Сплошной линией показаны результаты моделирования.

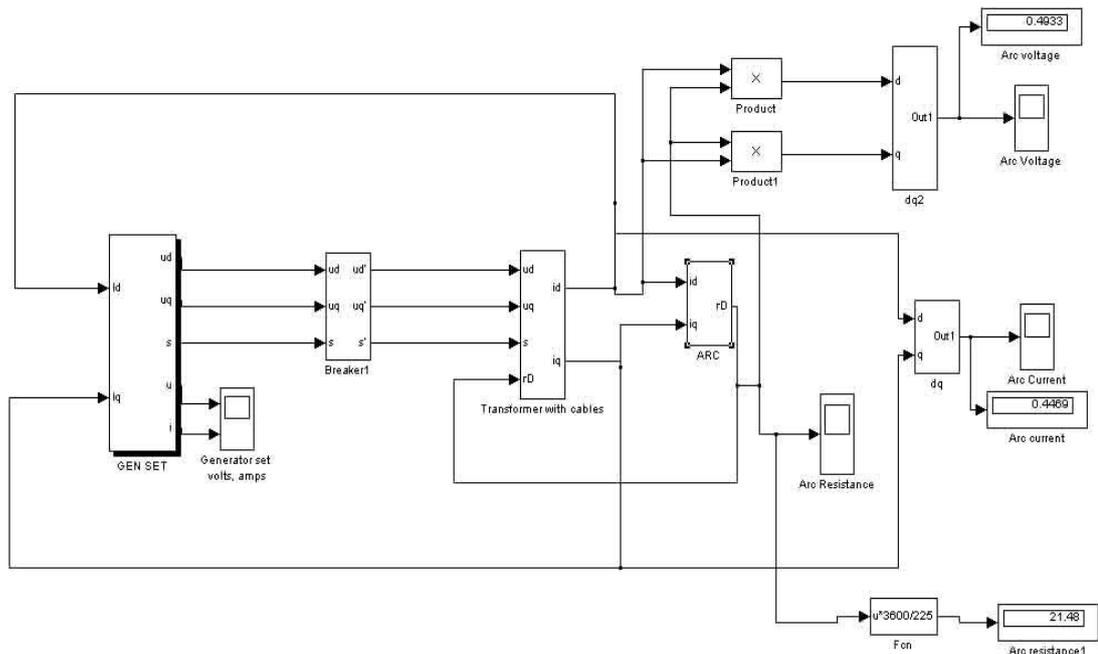


Рис. 4. Модель участка автономной сети в пакете Simulink

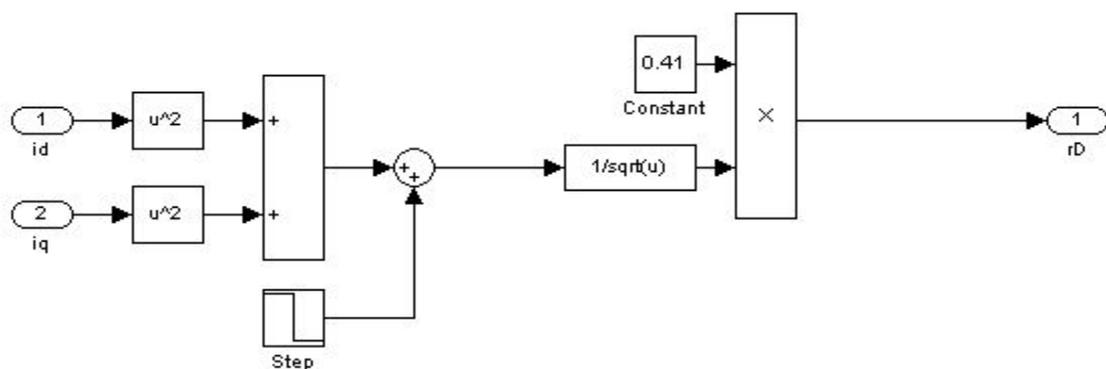


Рис.5. Блок ARC (модель электрической дуги)



Рис.6. Экспериментальная зависимость сопротивления дуги от длины кабеля с медными жилами за трансформатором 630 кВА и зависимость, полученная при моделировании



Рис.7. Экспериментальная зависимость сопротивления дуги от длины кабеля с медными жилами за трансформатором 160 кВА и зависимость, полученная при моделировании

При проведении моделирования коэффициент k принимался равным 0,41, что определяло падение напряжение на дуге в диапазоне от 47% до 59% номинального напряжения сети.

Приведенные графики подтверждают, что моделирование дает близкие к экспериментальным данным результаты. Следует отметить, что точный прогноз сопротивления дуги невозможен вследствие зависимости процессов, происходящих в канале дуги, от многих факторов, а именно: параметров схемы КЗ, характеристик элементов схемы, температуры окружающей среды, влажности, скорости движения воздуха, электромагнитных полей, наличия препятствий для дуги, состояния контактных поверхностей и изоляции, величины вибрации. Тем не менее, полученные в результате моделирования данные показали возможность:

- применения предложенной модели при компьютерном моделировании АЭС в режиме дугового КЗ;

- использования модели при определении токов дугового КЗ для проверки селективности, быстрействия и чувствительности защиты трансформаторов;

- рассмотрения модели и подхода к ее построению при разработке нормативных требований и рекомендаций по учету и моделированию электрической дуги при расчете и исследовании переходных процессов в АЭС с мощными распределительными трансформаторами в режиме короткого замыкания через дугу.

Литература

1. Федоренко. В.А. Моделирование судовой электроэнергетической системы в режимах металлических и дуговых коротких замыканий в среде Simulink / Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов ГМА им. адм. С.О.Макарова: сб. докл. - СПб., 2007. - С. 93.
2. Баранов А.П., Раимов М.М. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации. - СПб.: Элмор, 1997. - 232 с.
3. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – СПб.: Судостроение, 2005. – 528 с.
4. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках переменного тока до 1 кВ.
5. Калязин Е.А., Рокотян Ю.В., Филимонов В.Д., Игнатьев Л.Л. Электрическая защита судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1983.
6. Крючков И.И., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А, Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования. – М.:Издательский центр «Академия», 2005. - 416 с.
7. Отраслевой стандарт. ОСТ 5Р.6181-81. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета переходных процессов.
8. Отраслевой стандарт. ОСТ 5.6152-79. Судовые электроэнергетические системы. Правила выбора и методы расчета защиты.
9. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.