

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ МНОГОКОНТУРНОЙ ЦЕПЬЮ

Гуедиди Фаузи Бен Килани, Ларин А.М.

Донецкий национальный технический университет

lam@elf.dgtu.donetsk.ua

A method of mathematical modeling of electromagnetic transient processes at the sudden three-phase short circuits of turbogenerators with taking into account the magnetic flux saturation is offered. Herewith an equivalent circuit of the synchronous machine, in which excitation winding represented multiloops circuit is used. The researches results for industrial type turbogenerator TVV-160-2 are shown.

Введение. Моделирование электрических машин переменного тока (ЭМ) на основе теории электромагнитного поля является универсальным. Однако совокупность трехмерных электрических и магнитных полей в среде, содержащей переплетенные участки с разными магнитными и диэлектрическими свойствами, явление вытеснения тока, сложное распределение магнитных полей в отдельных элементах затрудняет строгое математическое описание переходных процессов. Использование такого подхода к моделированию промышленных машин в условиях эксплуатации, особенно когда имеет место влияние элементов питающей сети, неэффективно. Поэтому для описания переходных и установившихся режимов ЭМ, в большинстве случаев, используются дифференциальные уравнения электрических цепей машин вместо более полного моделирования с помощью уравнений электромагнитного поля. Такой упрощенный идеализированный подход обеспечивает необходимую достоверность расчетов только при достаточно точном определении параметров электрических машин с учетом таких явлений как вытеснение тока в обмотках и конструктивных элементах, а также насыщения путей магнитных потоков.

Это обуславливает необходимость совершенствования существующих моделей ЭМ в направлении большей их физической обоснованности, а также создания алгоритмов моделирования переходных процессов, которые бы обеспечивали быстрое и наглядное получение результатов с заданной точностью решения практических задач.

Анализ литературных источников. В настоящее время известен ряд расчетных и экспериментальных методов [1-5] определения электромагнитных параметров ЭМ в форме частотных характеристик или эквивалентных схем замещения с учетом влияния насыщения. По условиям соответствия электромагнитных параметров по данному, получаемым в рабочих режимах синхронных машин по реакциям на малые возмущения, вводимые в цепи обмоток возбуждения или статора, а также на возмущения мощности на валу машины. Это позволяет одновременно учитывать влияние таких факторов как насыщение основного магнитного пути, потоков рассеяния обмотки статора и роторных контуров, а также дополнительное изменение насыщения корней малых зубцов ротора, имеющее место из-за наличия поперечной реакции якоря. Для исследования ряда электромагнитных и электромеханических переходных процессов, протекающих при больших изменениях токов и напряжений, в этом случае необходимо использовать семейство частотных характеристик, соответствующих различным уровням насыщения.

Уточненное решение задачи распределения токов в отдельных контурах синхронных машин обуславливает необходимость определения зависимостей индуктивных сопротивлений рассеяния в функции токов, протекающих в соответствующих контурах машины. Такая задача решалась в [6] при разработке методики определения частотных характеристик и параметров эквивалентных схем замещения в функции протекающих в соответствующих контурах токов. Однако, практический учет таких зависимостей в математических моделях электрических машин затруднителен в следствие того, что параметры схем замещения зависят от искомого тока. В [7] изложены основные положения метода идентификации параметров турбогенераторов, основанного на экспериментальных данных, определяемых из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания (ТКЗ). При этом для схемы замещения, учитывающей различную взаимную индуктивность между контурами, получены зависимости параметров эквивалентного демпферного контура в функции начального значения периодического тока в обмотке статора для высокоиспользованных промышленных турбогенераторов серии ТВВ мощностью 160 и 500 МВт. Однако методика их использования для анализа режимов ТКЗ при различных уровнях насыщения отсутствует.

Цель работы. Разработка методики математического моделирования режимов трехфазных коротких замыканий в турбогенераторах с учетом влияния насыщения при использовании схем замещения различных структур, в том числе и для схемы, в которой обмотка возбуждения представлена многоконтурной цепью.

Материалы и результаты исследований. Принятая в [7] схема замещения СМ по продольной оси ротора, отражающая влияние не только явления вытеснения токов в обмотках и массиве ротора, но также и насыщения магнитных цепей, приведена на рис. 1.

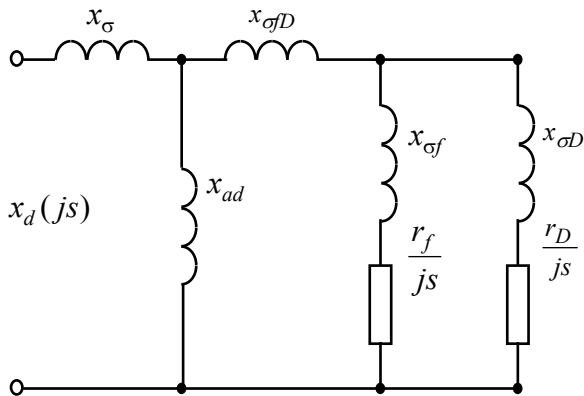


Рисунок 1 - Схема замещения ТГ типа ТВВ-160 с учетом различной взаимоиндукции между контурами

Таблица 1 - Параметры роторных контуров ТГ типа ТВВ-160-2 для схемы, представленной на рис.

U	$I_n(0)$	$x_{\sigma D}$	r_D
0,26	1,00	0,100	0,0218
0,47	2,15	0,360	0,0179
0,70	3,54	0,017	0,0123

но. В отличие от этого в асинхронных режимах с малым скольжением периодические токи небольшой частоты распространяются глубоко в поковку ротора и, следовательно, влияние величины тока не существенно. Поэтому использование указанных зависимостей для учета насыщения эффективно при исследованиях только режимов внезапных трехфазных коротких замыканий.

Таким образом, методика учета влияния насыщения при анализе внезапных трехфазных коротких замыканий на выводах турбогенератора типа ТВВ-160-2 заключается в предварительном определении значений параметров схемы замещения (рис.1) по соотношениям, полученным в [7]. На рис.2 и рис.3 приведены зависимости изменения токов в обмотках статора и возбуждения соответственно при моделировании внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах турбогенератора из режима холостого хода при напряжении $0,7U_{ном}$.

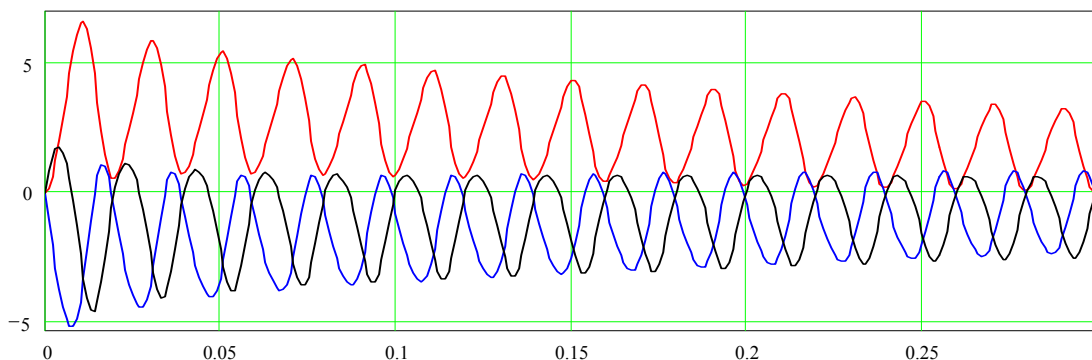


Рисунок 2 - Изменение токов в фазных обмотках статора при КЗ на выводах турбогенератора типа ТВВ-160-2

Для аналитического описания электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях удобна эквивалентная схема замещения с вынесенной на зажимы источника ветвью намагничивания (Γ – образная схема замещения). Такая схема наиболее эффективна и при моделировании с использованием дифференциальных уравнений.

При определении параметров указанной схемы замещения, соответствующих различным исходным условиям проведения опытов, принималось допущение о том, что от тока в обмотке статора зависят только индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и параметры эквивалентного демпферного контура. По данным [7] значения активного и индуктивного сопротивления рассеяния демпферного контура в зависимости от начального периодического тока ТКЗ приведены в табл.1. Величина индуктивного сопротивления взаимоиндукции между ОВГ и эквивалентным демпферным контуром, а также параметры обмотки возбуждения принимались постоянными.

Поскольку значения параметров приведенной схемы замещения получены путем обработки данных опытов коротких замыканий при изменении токов от максимальных значений до нулевого, а зависимости строились только от начального, то приближенный интегральный учет насыщения в этом случае производится выбором соответствующих параметров без последующего их пересчета на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений. Для этого в [7] получены аналитические зависимости параметров демпферного контура от тока статора.

Поскольку при внезапном коротком замыкании периодические токи в успокоительных контурах возникают в относительно неглубоком слое, то влияние величины тока на электромагнитные параметры значительно

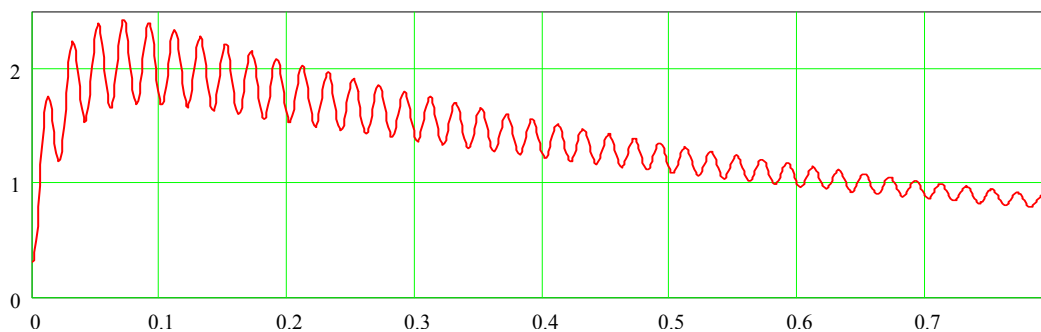


Рисунок 3 - Изменение тока в ОВГ при КЗ на выводах турбогенератора типа ТВВ-160-2

Использование этой схемы позволит создать универсальную программу расчета переходных процессов. Метод преобразования схем замещения различных структур к виду, удобному для моделирования, основанный на адекватности частотных характеристик проводимостей со стороны обмотки статора и частотной характеристики комплексного коэффициента распределения тока статора в ветви обмотки возбуждения, предложен в [8]. При этом обмотка возбуждения и эквивалентная демпферная система представляются собственными многоконтурными цепями (рис.4).

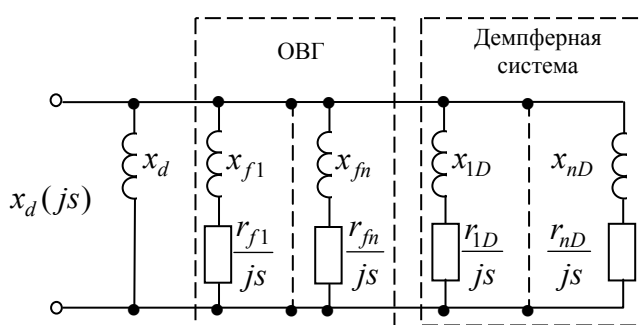


Рисунок 2 – Г-образная схема замещения при представлении ОВГ многоконтурной цепью

Рассмотрим возможность применения полученных в [7] зависимостей параметров от тока статора, для схемы замещения, показанной на рис.1, к схеме замещения Г – образного типа (рис.4). Для этого в соответствии с [8] выполним преобразование указанной схемы к виду, удобному для моделирования. Параметры последней в зависимости от начального тока короткого замыкания приведены в табл.2. Из табл.2 видно, что ОВГ и демпферная система представляются каждая двумя эквивалентными контурами. При этом некоторые из них имеют отрицательные величины.

Таблица 2 - Значения параметров схемы замещения ТГ типа ТВВ-160-2 при представлении ОВГ многоконтурной цепью

$I_{n(0)}$	ОВГ				Демпферная система			
	x_{f1}	r_{f1}	x_{f2}	r_{f2}	x_{D1}	r_{D1}	x_{D2}	r_{D2}
1,00	0,360	0,001569	-0,811	-0,09986	-7,393	-0,03219	0,487	0,05996
2,15	0,350	0,001557	-0,510	-0,08116	-9,271	-0,04121	0,298	0,04739
3,54	0,343	0,001538	-0,418	-0,05601	-21,88	-0,09819	0,241	0,03235

Значения электромагнитных параметров, полученные для дискретных величин тока статора, могут быть аппроксимированы аналитическими зависимостями вида $f(I) = a + bI + cI^2$. Как следует из анализа табл.2, значения первого контура, отражающего влияние ОВГ, незначительно зависят от начального тока статора. Так величина индуктивного сопротивления x_{f1} при изменении тока от 1,0 до 3,54 о.е. изменяется на 4,7%, а активное - всего на 1,9%. Поэтому можно с достаточной точностью считать, что от тока статора зависят параметры только одного контура, характеризующего ОВГ. Параметры, отражающие влияние демпферной системы, в большей степени зависят от тока статора. Однако, поскольку значения индуктивных сопротивлений первого контура на порядок больше второго, то их влияние будет несущественно. Это позволит сократить время на расчетные процедуры. Однако, поскольку предложенная методика не требует пересчета значений параметров схемы замещения на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений, то такой подход можно считать нецелесообразным.

Рассмотрим теперь методику анализа с учетом насыщения коротких замыканий за внешним сопротивлением, включенным в цепь статора генератора, например, трансформатор блока «генератор-трансформатор». Поскольку от величины внешнего сопротивления зависит начальное значение тока КЗ, то для определения параметров схемы замещения генератора, соответствующих заданному уровню насыщения, необходимо предварительно оценить начальное значение тока КЗ следующим образом $I_{n(0)} = \frac{U}{x_d + x_{en}}$. В соответствии с [7] на

ходятся для полученного значения тока статора параметры схемы замещения, показанной на рис.1. Внешнее

сопротивление при этом учитывается путем увеличения индуктивного сопротивления рассеяния статора. При моделировании с помощью схемы замещения с вынесенной на зажимы источника ветвью намагничивания должен быть выполнен предварительный ее синтез в соответствии с [8]. Следует заметить, что параметры роторных контуров в схеме замещения, показанной на рис.4, будут зависеть не только от тока статора, но и от внешнего сопротивления. В работе по результатам синтеза схемы замещения Г – образного типа для различных значений тока статора и внешнего сопротивления были получены аналитические зависимости, аппроксимирующие параметры схемы замещения уравнением вида

$$F(I_{n0}, x_{вн}) = A(I_{n0}) + B(I_{n0})x_{вн} + C(I_{n0})x_{вн}^2. \quad (1)$$

В свою очередь коэффициенты полинома (1), зависящие от тока статора описываются аналогичным выражением:

$$f(I_{n0}) = a + bI_{n0} + cI_{n0}^2. \quad (2)$$

Значения соответствующих коэффициентов приведены в табл.3

Таблица 3 - Значения коэффициентов полиномов, аппроксимирующих параметры схемы замещения ТГ типа ТВВ-160-2 в зависимости от начального тока и удаленности короткого замыкания

		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
<i>A</i>	x_{f1}	$3,720 \cdot 10^{-1}$	$-1,30 \cdot 10^{-2}$	$1,441 \cdot 10^{-3}$	r_{f1}	$1,577 \cdot 10^{-3}$	$-6,420 \cdot 10^{-6}$	$-1,27 \cdot 10^{-6}$
<i>B</i>		$1,135 \cdot 10^0$	$-1,20 \cdot 10^{-2}$	$4,414 \cdot 10^{-3}$		$7,404 \cdot 10^{-4}$	$-1,205 \cdot 10^{-5}$	$2,914 \cdot 10^{-6}$
<i>C</i>		$-1,80 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$1,300 \cdot 10^{-3}$		$-2,194 \cdot 10^{-5}$	$9,284 \cdot 10^{-6}$	$-1,632 \cdot 10^{-6}$
<i>A</i>	x_{f2}	$1,236 \cdot 10^0$	$-5,02 \cdot 10^{-1}$	$7,700 \cdot 10^{-2}$	r_{f2}	$1,150 \cdot 10^{-1}$	$-1,50 \cdot 10^{-2}$	$-5,763 \cdot 10^{-4}$
<i>B</i>		$2,398 \cdot 10^0$	$-7,31 \cdot 10^{-1}$	$1,170 \cdot 10^{-1}$		$1,790 \cdot 10^{-1}$	$-3,40 \cdot 10^{-2}$	$1,892 \cdot 10^{-3}$
<i>C</i>		$8,680 \cdot 10^{-1}$	$-4,88 \cdot 10^{-1}$	$7,800 \cdot 10^{-2}$		$8,600 \cdot 10^{-2}$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$-3,552 \cdot 10^{-3}$
<i>A</i>	x_{D1}	$-1,139 \cdot 10^1$	$6,676 \cdot 10^0$	$-2,616 \cdot 10^0$	r_{D1}	$-4,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$-1,1 \cdot 10^{-2}$
<i>B</i>		$6,181 \cdot 10^1$	$-6,513 \cdot 10^1$	$2,401 \cdot 10^1$		$3,66 \cdot 10^{-1}$	$-3,06 \cdot 10^{-1}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$
<i>C</i>		$-1,295 \cdot 10^2$	$1,514 \cdot 10^2$	$-5,464 \cdot 10^1$		$-8,14 \cdot 10^{-1}$	$7,61 \cdot 10^{-1}$	$-2,87 \cdot 10^{-1}$
<i>A</i>	x_{D2}	$7,56 \cdot 10^{-1}$	$-3,17 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	r_{D2}	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$-1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$
<i>B</i>		$2,991 \cdot 10^0$	$-1,086 \cdot 10^0$	$1,73 \cdot 10^{-1}$		$2,61 \cdot 10^{-1}$	$-4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,869 \cdot 10^{-3}$
<i>C</i>		$7,1 \cdot 10^{-2}$	0	0		$9,708 \cdot 10^{-3}$	$-7,696 \cdot 10^{-5}$	$-1,07 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчета коротких замыканий выполненных для различных удаленностей и напряжений в исходном режиме при использовании различных схем замещения совпали между собою.

Вывод. Предложена методика математического моделирования электромагнитных переходных процессов при трехфазных коротких замыканиях в турбогенераторах с учетом влияния насыщения путей магнитных потоков при использовании эквивалентных схем замещения различных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казовский Е.Я. Методика определения электромагнитных параметров синхронной машины, работающей под нагрузкой / Е.Я. Казовский, Л.Г. Лернер // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1977.- № 1.- С.44-52.
2. Герасимов С.Е. Влияние насыщения турбогенераторов на токи короткого замыкания / С.Е. Герасимов, С.Л. Соловьев // Установившиеся и переходные режимы работы электрических систем.: Тр. ЛПИ. – Л. - 1982. - № 385. – С. 44-47.
3. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы / Г.Г. Рогозин. - К.: Техніка. - 1992. – 168 с.
4. Rogozin G.G. Determining the electromagnetic parameters of AC machines / G.G. Rogozin // Revu general de l'electricite. – 1993. – N9. – P. 8-16.
5. Kazuo Shima. Analysis of magnetic saturation in a salient-pole synchronous machine after sudden three-phase short circuit / Kazuo Shima, Kazumasa Ide, Miyoshi Takahashi // Electrical Engineering in Japan, v 145, n 4.- December. - 2003. - P. 46-55.
6. Рогозин Г.Г. Об использовании функциональных характеристик при учете влияния насыщения синхронных машин / Г.Г. Рогозин, И.И. Ларина // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. - №6. – С.61-68.
7. Рогозин Г.Г. Определение зависимости параметров эквивалентного демпферного контура турбогенератора от начального значения тока короткого замыкания / Г.Г. Рогозин, А.М. Ларин, И.И. Ларина // Электротехника. – 1999. - №12. – С. 14-17..
8. Ларин А.М. Преобразование сложных эквивалентных схем замещения турбогенераторов к виду, удобному для моделирования переходных процессов / А.М. Ларин, Гуедиди Фаузи Бен Килани // Вісник СНУ. – 2007. - №11(117), ч.1. – С. 108-115.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.