

УДК 621. 313.322

А.М. ЛАРИН (канд.техн.наук, доц.), И.И. ЛАРИНА (канд.техн.наук, доц.)

Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
lam@elf.dgtu.donetsk.ua

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННЫХ МАШИНАХ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР

Предложен единый подход к математическому моделированию переходных процессов в синхронных машинах на основе сложных детализированных эквивалентных схем замещения путем предварительного их преобразования к одному виду, удобному для аналитического описания с помощью дифференциальных уравнений Парка-Горева.

Моделирование, синхронная машина, схема замещения, преобразование

Введение. Одна из областей теории синхронных машин (СМ) – исследование процессов в различных режимах работы – основывается на том, что предполагается известной определенная совокупность активных и индуктивных сопротивлений, отражающих связь между токами и потокоцеплениями в магнитносвязанных контурах машины. Такая исходная информация представляется в форме схем замещения физически обоснованных структур, имеющих различную степень детализации. Известно большое число точных детализированных сложных схем замещения СМ с различными структурами, отражающими взаимные связи отдельных конструктивных элементов машины [1-6]. Каждый тип синхронного генератора с учетом особенностей конструкции ротора, представляется отдельной схемой замещения. Такие схемы используют в проектных организациях и в заводской практике для уточненного исследования распределения токов в демпфирующих контурах, влияния параметров различных участков конструкции на результирующие параметры машины и влияния насыщения этих участков на параметры и распределение токов. Их применяют также к расчету установившихся аномальных режимов, связанных с большими скольжениями (несимметричная нагрузка, несимметричные короткие замыкания, неполнофазные режимы). Анализ электромеханических переходных процессов для мгновенных значений параметров режима с помощью таких сложных эквивалентных схем высокого порядка вызывает принципиальные сложности. При расчете переходных процессов, например в операторной форме, это приводит к сложным операторным выкладкам, не всегда дающим возможность при практических расчетах выполнить переход во временную область. При этом для глубокого исследования различных режимов необходимо разрабатывать индивидуальное программное обеспечение для ПЭВМ, реализующее соответствующие математические модели. Одна из таких программ «ARTS» разработана в ИЭД НАН Украины для расчетов установившихся асинхронных режимов турбогенераторов при их представлении многозвенными электрическими схемами [6]. Поэтому использование сложных детализированных схем к моделированию промышленных машин в условиях эксплуатации, особенно когда имеет место влияние элементов питающей сети, неэффективно.

Вместе с тем имеется широкий круг задач, когда достаточно только точно определить распределение токов в контуре обмотки возбуждения (ОВГ) и эквивалентно в массивных конструктивных элементах ротора (ДС).

В общем комплексе проблем исследования переходных процессов и устойчивости энергосистем актуальной является задача рационального математического моделирования электрических машин переменного тока.

В этой связи целесообразна постановка задачи, направленная на разработку методов преобразования сложных детализированных схем замещения к виду, удобному для моделирования переходных процессов по дифференциальным уравнениям типа уравнений Парка-Горева. При этом необходимо, чтобы в упрощенных схемах достоверно определялись параметры переходных режимов как в обмотке статора, так и в обмотке возбуждения. Это позволит составить универсальную программу расчета на ПЭВМ для исследования различных видов переходных процессов.

Целью настоящей работы является разработка обобщенного подхода к преобразованию сложных эквивалентных схем замещения различных структур к одному виду, наиболее удобному для моделирования переходных процессов по дифференциальным уравнениям Парка-Горева на основе единой универсальной программы для ПЭВМ.

Материалы и результаты исследований. Для анализа протекания электромеханических переходных процессов во времени, как правило, используются упрощенные схемы замещения, на основании которых составляются дифференциальные уравнения типа уравнений Парка-Горева. Расчеты электромагнитных и электромеханических переходных процессов в синхронных машинах без учета влияния насыщения по полным уравнениям Парка-Горева позволяют учитывать влияние неограниченного числа контуров на роторе. ОВГ в этом случае представляется в эквивалентной схеме одним контуром с независимыми от частоты параметрами (рис.1).

© Ларин А.М., Ларина И.И., 2011

Обычно используют уравнения, записанные в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= \psi_q(1+s) - r_s i_d - u \cdot \sin(\delta); \\ \frac{d\psi_{fk}}{dt} &= u_f - r_f i_f; \\ \frac{d\psi_{Dm}}{dt} &= -r_{Dm} i_{Dm}, \quad m = 1, 2, \dots, n_D; \\ \frac{d\psi_q}{dt} &= -\psi_d(1+s) - r_s i_q + u \cdot \cos(\delta); \\ \frac{d\psi_{ql}}{dt} &= -r_{ql} i_{ql}, \quad l = 1, 2, \dots, n_q; \\ \frac{ds}{dt} &= \frac{1}{T_j} [M_T + (\psi_d i_q - \psi_q i_d)]; \\ \frac{d\delta}{dt} &= s. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Потокосцепления любой обмотки в (1) могут быть выражены на основе собственных и взаимных индуктивных сопротивлений следующим образом:

$$\Psi_i = \sum_{j=1}^j x_{ij} i_j, \quad (2)$$

где x_{ij} - взаимная индуктивность между i и j обмотками. Если $i=j$, то индуктивное сопротивления является собственным.

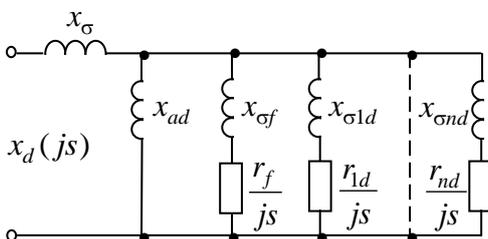


Рисунок 1 - Схема замещения СМ по продольной оси ротора

Очевидно, что для сложных схем замещения определение собственных и взаимных индуктивных сопротивлений, связывающих токи и потокосцепления, представляет достаточно сложную задачу. При этом на каждом шаге интегрирования уравнений (1) необходимо несколько раз решать систему линейных алгебраических уравнений (2) относительно токов. Поэтому непосредственное использование для математического моделирования по дифференциальным уравнениям Парка-Горева схем замещения сложных структур неэффективно. Для схемы замещения общепринятого типа (рис.1), в которой обмотка возбуждения представлена одним контуром, в [7] предложен способ интегрирования уравнений вида (1), не требующий решения системы алгебраических уравнений. Используемые для определения токов проводимости при этом рассчитываются до начала процедуры интегрирования уравнений.

Метод упрощения сложных схем замещения путем их преобразования к виду, удобному для моделирования по уравнениям (1) изложен в [8]. Способ основан на том, что кроме соблюдения адекватности частотных характеристик $y_d(js)$ исходной и преобразованной схем замещения синтез последней необходимо осуществлять при равенстве комплексного коэффициента распределения тока статора в ветви ОВГ ($C_f(js)$). В этом случае ветвь ОВГ будет уже представляться самостоятельной многоконтурной цепью (рис.2).

Схемы замещения вида, представленного на рис.2, могут быть также определены экспериментально, по данным опытов внезапного трехфазного короткого замыкания [9]. Получаемые в этом случае параметры эквивалентных схем замещения, которые рассчитываются непосредственно по данным обработки переходных функций токов в обмотках статора и возбуждения в

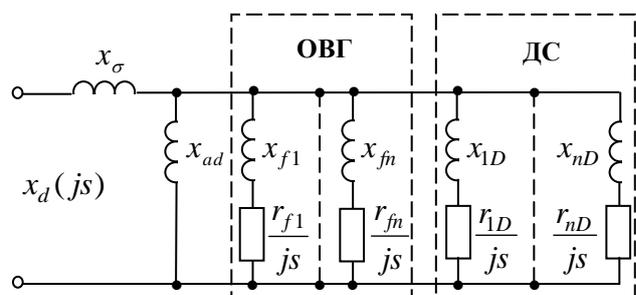


Рисунок 2 - Схема замещения СМ при представлении ОВГ многоконтурной цепью

опыте внезапного трехфазного короткого замыкания соответствуют короткозамкнутому состоянию обмотки возбуждения. Такие схемы замещения непосредственно можно использовать только для исследования переходных процессов, имеющих место при короткозамкнутом состоянии ОВГ. При анализе динамических режимов, имеющих место при включении в цепь обмотки возбуждения дополнительного (чаще всего активного) сопротивления необходимо предварительно выполнить ряд расчетных процедур.

Рассчитать частотную характеристику результирующей проводимости ветви ОВГ после включения дополнительного активного сопротивления $y_{fR_{доп}}(js)$:

$$y_{fR_{доп}}(js) = \frac{1}{\frac{1}{y_f(js)} + \frac{R_{доп}}{js}} \tag{3}$$

По найденной частотной характеристике $y_{fR_{доп}}(js)$ выполнить синтез параметров многоконтурной обмотки возбуждения новой схемы замещения. Параметры, отражающие влияние демпферной системы остаются прежними.

Очевидно, что такой подход является неэффективным. Поэтому целесообразно синтезировать схемы замещения различных структур, в которых в последовательной цепи было бы выделено известное активное сопротивление обмотки возбуждения (рис.3).

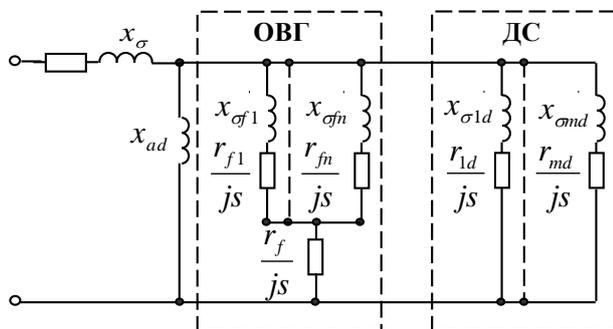


Рисунок 3 - Схема замещения СМ при представлении ОВГ многоконтурной цепью с выделенным активным сопротивлением ОВГ

Такой подход, с одной стороны, при экспериментальном определении позволит повысить точность расчета параметров, отражающих влияние ОВГ, а с другой - упростить использование схем замещения при моделировании переходных процессов с включенным в цепь ОВГ дополнительным сопротивлением.

Синтез параллельных индуктивно-активных цепочек, отражающих влияние обмотки возбуждения генератора ($x_{σf1}, x_{σf2}, \dots, x_{σfn}; r_{f1}, r_{f2}, \dots, r_{fn}$) при этом во всех случаях должен осуществляться на основе частотных характеристик проводимости ОВГ $y_f^*(js)$ без учета ее активного сопротивления r_f :

$$y_f^*(js) = \frac{1}{\frac{1}{y_f(js)} - \frac{r_f}{js}} \tag{4}$$

Для математического моделирования переходных процессов на основе схемы замещения, в которой ОВГ учитывается многоконтурностью (рис.3) с выделенным активным сопротивлением, была уточнена приведенная система дифференциальных уравнения Парка-Горева (1). Дополнения состоят в том, что число уравнений, отражающих влияние обмотки возбуждения, должно соответствовать числу контуров, характеризующих ее в схеме замещения. Кроме того, учитывается активное сопротивление ОВГ, вынесенное в последовательную цепь. Моделирование с дополнительным активным сопротивлением в ОВГ осуществляется, в этом случае, путем соответствующего увеличения значения активного сопротивления ОВГ.

Тогда в уточненной системе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические переходные процессы, применительно к схеме замещения вида, показанного на рис.3, должно быть изменено уравнение, описывающее процессы в ОВГ. Последнее будет иметь следующий вид:

$$\left. \frac{d\psi_{fk}}{dt} = u_f - r_{fk} i_{fk} - r_f \sum_{k=1}^{n_f} i_{fk}, \quad k = 1, 2, \dots, n_f; \right\} \tag{5}$$

Значения токов в (1) с учетом (5) определяются в соответствии с [7].

Уточненная система уравнений была реализована в виде программы расчета электромеханических переходных процессов для ПЭВМ в среде прикладного пакета MathCAD. Эффективность предложенного подхода оценивалась путем математического моделирования переходных режимов в турбогенераторе типа ТГВ-200М. На основе его исходной детализированной схемы замещения, показанной на рис.4, в соответствии с [8] была синтезирована схема замещения вида, представленного на рис.3. Значения параметров последней

приведены в табл.1.

Таблица 1 - Значения параметров схем замещения ТГ типа ТГВ-200М ($r_f = 0,00107$)

Тип схемы замещения		Параметр	Значения параметра, о.е.				
Г – образная $x_d = 1,916$	ОЗГ	x	0.469000	7.25900	-1.6910	-0.7610	2.1300
		r	0,000147	0,04994	-0,+1327	-0,5824	2,3788
Т – подобная $x_\sigma = 0,213$; $x_{ad} = 1,703$	ОЗГ	x	0.17300	-0.0074	0.00720	-0.2160	0.00008
		r	0,00000	-0,0020	0,00199	-0,1600	0,38400

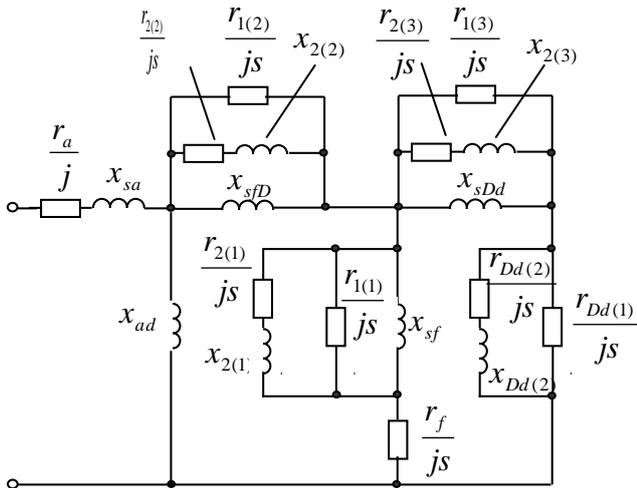


Рисунок 4 - Сложная детализированная схема замещения ТГ ТГВ-200М

Анализировались электромагнитные и электромеханические переходные процессы при ВКЗ на выводах исследуемого генератора и асинхронных режимах. Оценка степени достоверности полученных в работе моделей осуществлялась в каждом случае путем сопоставления результатов расчета токов в обмотках статора и возбуждения с экспериментальными данными.

Анализ асинхронных режимов выполнялся сопоставлением средних статических характеристик исследуемого турбогенератора, а также путем расчета электромеханических переходных процессов, вызванных выпадением из синхронизма и переходом к установившемуся асинхронному режиму после потери возбуждения и последующего замыкания обмотки возбуждения на пятикратное сопротивление самосинхронизации.

Исследование электромеханических переходных процессов в установившемся

асинхронном режиме турбогенератора осуществлялось для простейшей расчетной системы: генератор – блочный трансформатор – эквивалентное сопротивление системы – шины неизменного напряжения.

Изменение некоторых параметров в установившемся асинхронном режиме генератора при исходной активной мощности 40% от номинальной, допустимой по условиям эксплуатации в течение 15 мин., показаны на рис.5. Действие регуляторов скорости при расчете не учитывалось.

В табл.2 приведены результаты расчета экстремальных и средних значений токов в обмотках статора и возбуждения, а также электромагнитной мощности. Там же приведены значения параметров асинхронного режима, зарегистрированные в опыте.

Исследования показали, что наибольшая погрешность имеет место при определении максимального значения активной мощности при колебаниях и составляет 12,6%. При этом минимальное и среднее значения отличаются от экспериментальных данных не более чем на 5,2%. Экстремальные и среднее значения тока статора отличаются от соответствующих экспериментальных данных не более, чем на 10%.

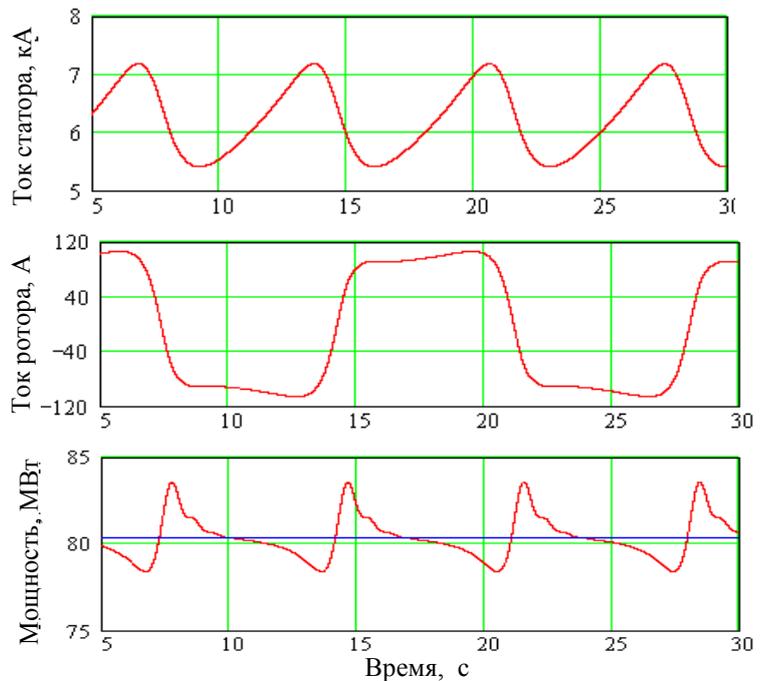


Рисунок 5 – Изменение параметров в установившемся асинхронном режиме турбогенератора типа ТГВ-200М

Таблиця 2 – Параметри асинхронного режиму турбогенератора ТГВ-200М

Параметр		Екстремальні значення		Помилка, %
		Розрахунок	Досвід	
$P, \text{ MВт}$	P_{max}	83,6	95,7	12,6
	P_{min}	78,4	75,2	4,30
	P_{cp}	81,0	85,4	5,20
$I, \text{ А}$	I_{max}	7,18	7,50	4,30
	I_{min}	5,41	6,00	9,80
	I_{cp}	6,29	6,75	6,80
$I_f, \text{ А}$		± 106	± 110	3,60
Період проворота ротора, с		13,6	11,8	16,9

Розрахункові та експериментальні значення струму в ОБГ практично збіглися між собою. Різниця становить 3,6%.

Найбільша похибка при моделюванні асинхронного режиму турбогенератора типу ТГВ-200М має місце при визначенні періоду одного проворота ротора відносно полюса статора. Вона становить 16,9%. Цей параметр визначався за кривою зміни струму в обмотці збудження.

Така похибка може бути пояснена тим, що при моделюванні перехідних процесів при випаданні з синхронізму і переході в установившийся асинхронний режим не враховувалося дія регулятора швидкості, яке має місце в реальних умовах експлуатації досліджуваного турбогенератора.

Висновок. Представлено єдиний підхід до математичного моделювання перехідних процесів в синхронних машинах на основі складних деталізованих еквівалентних схем заміщення шляхом попереднього їх перетворення до одного виду, зручного для аналітичного опису за допомогою диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Казовський Е.Я. Перехідні процеси в синхронних машинах при аномальних режимах в енергосистемі / Е.Я. Казовський, Г.В. Рубісов. – СПб.: Наука, 1994. – 172 с.
2. Рогозін Г.Г. Визначення електромагнітних параметрів машин перемінного струму. Нові експериментальні методи / Г.Г. Рогозін. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
3. Лютер Р.А. Розрахунок синхронних машин / Р.А. Лютер. – Л.: Енергія, 1979. – 272 с.
4. Шапіро А.С. Схема заміщення турбогенератора при великих скольженнях з урахуванням клинєв і торцевого ефекту / А.С. Шапіро // Турбо- і гідроенергетики великої потужності і перспективи їх розвитку. – Л.: Наука, 1969. – С. 153-167.
5. Саратов В.А. Схема заміщення, параметри і втрати в роторі турбогенератора при несиметричній навантаженні / В.А. Саратов // Технічна електродинаміка. – 2004. – №2. – С.35-39.
6. Саратов В.А. Асинхронні характеристики турбогенераторів 100 МВт енергоблоків ТЭЦ / В.А. Саратов // Технічна електродинаміка. – 2004. – №4. – С.38-41.
7. Лернер Л.Г. К вопросу об интегрировании уравнений Горєва-Парка / Л.Г. Лернер // В кн. Автоматизация вычислений и обработка информации в крупном электромашиностроении. – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1976. – С. 41-45.
8. Ларин А.М. Преобразование сложных эквивалентных схем заміщення турбогенераторів до виду, зручного для моделювання перехідних процесів / А.А. Ларин, Гуєдиди Фаузі Бен Кілані // Вісник Східноукраїнського нац. ун.-ту. – 2007. – №11 (117). – Ч. 1. – С. 108-115.
9. Ларин А.М. Експериментальне визначення параметрів схем заміщення синхронних машин при представленні обмотки збудження багато контурною ланкою / А.М. Ларин, Гуєдиди Фаузі Бен Кілані // Електротехніка і Електромеханіка. – 2008. – №3. – С.37-40.

Надійшло до редакції 11.04.2011

Рецензент: В.Ф.Сивокобилєнко

А. М. ЛАРИН, І. І. ЛАРИНА
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»

A. LARIN, I. LARINA
State Institution of Higher Education
«Donetsk National Technical University»

Універсальний підхід до моделювання перехідних процесів в синхронних машинах на основі складних схем заміщення різних структур. Запропоновано загальний підхід до математичного моделювання перехідних процесів в синхронних машинах на основі складних деталізованих еквівалентних схем заміщення шляхом попереднього їх перетворення до одного виду, зручного для аналітичного опису за допомогою диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Моделювання, синхронна машина, схема заміщення, перетворення.

Universal Approach to the Design of Transient Processes in Synchronous Machines Based at Complex Equivalent Circuits of Different Structures. The common approach is offered to the mathematical design of transient processes in synchronous machines at the basis of complex detail equivalent circuits by their preliminary transformation to one type comfortable for analytical description by Parka-Gorev differential equalizations.

Design, synchronous machine, equivalent circuit, transformation.