МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Н.Н.БЛОЦКИЙ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ СИММЕТРИЧНЫХ МАШИН

(Специальность 05.275 - Электрические
сети и системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 1971

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы и темпы работ по электрификации СССР непрерывно возрастают. Ввод в строй новых энергетических мощностей, увеличение дальностей линий электропередач, освоение новых типов электроустановок, рост энергетического хозяйства страны в целом ставят перед специалистами новые и сложные задачи.

Вопросы стационарных и переходных процессов в электрических сетях и электрических машинах, вопросы аварийных режимов и связанные с ними вопросы устойчивости и надежности электроустановок с учетом возросшей сложности электрических сетей, систем и их элементов становятся все более трудоемкими с точки зрения их решения.

Процессы в современных энергетических системах и их элементах описываются дифференциальными уравнениями высокого порядка. Присутствие в системах вращающихся электрических машин приводит к тому, что указанные дифференциальные уравнения становятся нелинейными, содержат переменные, в частности гармонические коэффициенты. Положение усугубляется, если в системе наблюдается какая-либо несимметрия (короткое замыкание, обрыв фаз и т.п.).

В последние два десятилетия в связи с развитием вычислительной техники и появлением цифровых вычислительных машин (ЦВМ) все большее значение приобретает метод численного решения дифференциальных уравнений. Можно утверждать, что только этот путь и позволяет справиться с трудностями, связанными с решением нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Однако применение ЦВМ требует от специалистов сложной подготовительной работы по алгоритмизации задач.

Несмотря на большие объемы памяти и большие скорости операций, возможности современных ЦВМ все же ограничены. Это ставит перед инженерами задачу максимально упростить исходные уравнения, с тем чтобы ЦВМ была способна "принять" их и достаточно быстро решить.

Из сказанного видно, что вопросы преобразования и упрощения исходных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в тех или иных электроустановках, являются важными вопросами теоретической электротехники

Настоящая диссертационная работа посвящена в основном одному из разделов общей проблемы преобразования - преобразованию уравнений электрических машин переменного тока, а также связанным с ним вопросам расчета несимметричных режимов электрических машин с симметричным ротором.

Электрическая машина, как элемент электрической системы, может работать в симметричных и несимметричных режимах, причем несимметрия возникает по внешним причинам (короткие замыкания и обрывы в сети, несимметричная нагрузка) и по причинам внутреннего характера (несимметрична конструкция машины или в ней наблюдаются короткие замыкания). В любом случае электрическая машина в совокупности с внешними цепями представляется как некоторая эквивалентная несимметричная машина.

И в том, и в другом случаях система дифференциальных уравнений электрической машины в исходном виде содержит гармонические коэффициенты, исключение которых существенно упрощает уравнения.

Одна из проблем, которая исследуется в диссертации, - это возможность исключения гармонических коэффициентов из исходных

уравнений машины переменного тока, причем рассматривается общий вид машины (число контуров на статоре и роторе машины произвольно, магнитные оси контуров сдвинуты друг относительно друга на произвольные углы, параметры контуров произвольны).

Указанный вопрос решается в гл.I и П. Он охватывает два момента. Первый - вывод условий (критериев), с помощью которых можно определить, существует ли преобразование, исключающее гармонические коэффициенты из исходных уравнений. Второй момент - построение способа, позволяющего найти требующееся преобразование в том случае, когда критерии показывают, что оно существует.

Вопросу преобразования уравнений электрической машины, которое приводит к исключению гармонических коэффициентов, посвящена обширная литература. Вслед за основополагающими работами Р.Парка и А.Горева этот вопрос рассматривался многими зарубежными и советскими специалистами, в частности Г.Кроном, Я.Ку, Р.Догерти и К.Найклом, Лайоном, Ч.Конкордиа, А.Г.Иосифьяном, Д.А.Городским, Л.Н.Грузовым, Е.Я.Казовским, С.В.Страховым, А.А.Янко-Триницким и многими другими. Результаты, полученные в этих работах, обобщаются следующими положениями:

- Если статор машины симметричен, а ротор несимметричен, то какой бы ни была несимметрия - магнитной (явнополюсность), электрической (несимметрия параметров), геометрической (несимметрично расположены магнитные оси обмоток) - всегда к исключению гармонических коэффициентов приводит преобразование в систему координат, жестко связанную с ротором ($d,q,0$; $f,b,0$ или какие-либо их модификации).

- Если симметричен ротор машины, но несимметричен статор, то независимо от вида его несимметрии к исключению гармонических

Главы I и П

Преобразования электромеханических уравнений электрических машин переменного тока

Первая глава работы носит подготовительный характер. Здесь прежде всего принимается система условий идеализации для электрической машины переменного тока. На основе этих условий с точностью до значений коэффициентов записываются исходные дифференциальные уравнения контуров, при этом энергетические соотношения позволяют сразу же вывести общую формулу для электромагнитного момента. Далее для неявнополюсных машин, которые в основном и рассматриваются в работе, на базе уравнений электромагнитного поля было рассчитано магнитное поле в зазоре. Это позволило получить формулы для определения параметров контуров идеализированной машины - индуктивностей и взаимоиндуктивностей - и, тем самым, задать в исходных уравнениях коэффициенты как функции геометрических размеров машины, чисел витков контуров, угла поворота ротора относительно статора γ .

Поскольку в теоретических исследованиях мы имеем дело с идеализированной машиной, а результаты этих исследований используем для реальных машин, необходимо оценить ту погрешность, которую вносят условия идеализации. С этой целью в первой главе работы приводятся расчеты параметров контуров по практическим формулам, справедливость которых подтверждается многочисленными экспериментами. Результаты этих расчетов сравниваются с расчетами по формулам для идеализированных машин. Сравнение показало, что последние дают качественно правильные результаты, а погрешность лежит в пределах до 20-30%.

Вторая глава работы полностью посвящена задаче преобразования электромеханических уравнений.

Характерной чертой исследований по теории преобразований электромеханических уравнений электрических машин переменного тока, о которых говорилось во введении, является то, что, как правило, преобразования координат вводятся на основе тех или иных физических рассуждений, а не выводятся, исходя из требования получить желаемый конечный результат (скажем, исключить гармонические коэффициенты) и свойств коэффициентов исходной системы уравнений, т.е. из свойств матрицы $\|L\|$.

Вследствие этого мы не всегда, применяя то или иное преобразование, можем сказать заранее, избавимся ли от гармонических коэффициентов. Нельзя также всегда предугадать заранее, каков будет конечный вид системы уравнений. Речь, конечно, идет о применении известных преобразований к еще не исследованным случаям электрических машин.

Вместе с тем подход к решению задачи преобразования, исходным пунктом которого является получение требующегося конечного результата, представляется более общим. Именно этот подход принят в диссертационной работе.

Мы можем дать следующую формулировку исследуемой задачи: задана исходная система электромеханических уравнений C^{I}. Задается конечная система уравнений C^{II}. На основе анализа коэффициентов исходной и конечной систем решается задача существования преобразования, переводящего систему C^{I} в систему C^{II}. В случае, если такое преобразование возможно, решается задача его отыскания.

Исходные уравнения электрической машины записываются в матричном виде

$$|U| = |z|\cdot|i| + \frac{d}{dt}\left(|L|\cdot|i|\right)$$

$$J\frac{d^2\gamma}{dt^2} + M_э = M_т$$

$$M_э = \frac{1}{2}|i|_т\frac{d}{d\gamma}|L|\cdot|i| \qquad \ldots(\mathrm{I})$$

Общая задача преобразования касается прежде всего контурных уравнений, т.е. переменных $i_1; i_2; i_3; \ldots; i_n$ (переменная γ преобразуется независимо от токов или же не преобразуется совсем). Преобразование токовых переменных означает введение n независимых функций, каждая из которых в общем случае зависит от всех исходных переменных

$$I_j = f_j(i_1; i_2; \ldots; i_n) \qquad j = 1;2;\ldots;n \qquad \ldots(2)$$

где $I_1; I_2; \ldots; I_n$ – новые переменные. Число новых переменных равно числу исходных.

Теперь о задании конечного (желаемого) вида уравнений. Исходные контурные уравнения линейны относительно переменных $i_1; i_2; i_3; \ldots i_n$ Естественно требование сохранить линейность конечной системы уравнений C^{II} относительно новых переменных $I_1; I_2; \ldots; I_n$, поскольку линейные уравнения представляют собой наиболее простую форму уравнений. И хотя одно это требование не дает ответа на вопрос о виде конечной системе C^{II}, оно определяет линейность преобразования и позволяет записать искомые соотношения (2) в виде следующих эквивалентных друг другу матричных выражений

$$|I| = |Z|^{-1}\cdot|i| \ ; \ |i| = |Z|\cdot|I| \qquad \ldots(3)$$

где $|Z|$ – искомая квадратная матрица преобразования.

Анализ показывает, что исходная система с помощью линейного преобразования (3) может быть приведена (в том смысле, что такое приведение логически не исключается, хотя в том или ином конкретном случае может и не существовать) к двум формам:

$$|U| = |Z|\frac{d}{dt}|I| + |R|\cdot|I| \ ; \quad |Z| \ ; \ |R| = const \qquad \ldots(4)$$

$$|U| = |Z|\frac{d}{dt}|I| + |R||I| + \dot{\gamma}|M||I|; \ |Z|,|R|,|M| = const \qquad \ldots(5)$$

где $|U|$ – преобразованная столбцевая матрица исходных напряжений $U_1; U_2; \ldots U_n$

Формы (4) и (5) не содержат гармонических коэффициентов и будут считаться конечными (желаемыми) для преобразованной системы уравнений C^{II}.

В случае приведения уравнений к форме (4) искомая матрица преобразования должна удовлетворять условию

$$|Z|^{-1}|L|\cdot|z|\cdot|Z| + |Z|^{-1}|L|^{-1}\frac{d}{dt}\left(|L|\cdot|Z|\right) = const \qquad \ldots(6)$$

В случае же преобразования исходных уравнений в форму (5) эта матрица должна удовлетворять двум условиям

$$|Z|^{-1}|T||Z| = const$$

$$|Z|^{-1}\frac{d}{dt}\left(|T||Z|\right) = const \qquad \ldots(7)$$

При этом введено обозначение

$$|T| = |Z|^{-1}|L| \qquad \ldots(8)$$

Заметим, что уравнения (5) нельзя считать уравнениями с постоянными коэффициентами из-за наличия множителя $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$ Однако преобразование Парка – Горева во всех известных случаях сводит исходную систему контурных уравнений именно к виду (5).

Следует сказать, что ввиду наличия двух конечных форм - (4) и (5) - нельзя ставить вопрос об исключении гармонических коэффициентов вообще, абстрагируясь от той или иной конечной формы, ибо может оказаться, что для данной конкретной системы исходных уравнений существует матрица преобразования, приводящая к форме (4), в то время как не существует матрицы преобразования, обеспечивающей форму (5),

Подводя итоги, можно сказать, что фактически перед нами две задачи преобразования - исследование преобразуемости уравнений к виду (4), а также к виду (5). Обе задачи рассматриваются в диссертационной работе. Исследования первой задачи показали, что для уравнений любой электрической машины, т.е. каковыми бы ни были матрицы $|r|$ и $|L|$, в системе (I), существует матрица $|Z|$, удовлетворяющая условию (6), поэтому переход к форме (4) принципиально всегда возможен. Вместе с тем казалось, что эта возможность имеет лишь теоретическое значение, ибо при попытке отыскать матрицу преобразования в явном виде возникают математические трудности, равносильные тем, которые появляются при попытке решить исходную систему уравнений без предварительного преобразования к форме (4).

В некоторых частных случаях, однако, матрица $|Z|$ поддается представлению в явной форме. Например, для неявнополюсной электрической машины с одним контуром на роторе и одним на статоре, если принять для простоты равенство параметров контуров, можно получить следующую матрицу преобразования, приводящую исходные уравнения этой машины к виду (4):

$$|Z| = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} e^{M_1} & e^{M_2} \\ e^{M_1} & -e^{M_2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e^{\alpha_1 t} & e^{-\alpha_1 t} \\ e^{-\alpha_2 t} & -e^{-\alpha_2 t} \end{vmatrix} \quad \ldots(9)$$

где α_1 и α_2 - любые постоянные, не равные нулю, а M_1 и M_2 - суть следующие функции:

$$M_1 = -\int \frac{r - \dot{\gamma} M \sin\gamma}{L + M\cos\gamma} dt, \quad M_2 = -\int \frac{r + \dot{\gamma} M \sin\gamma}{L - M\cos\gamma} dt \quad \ldots(I0)$$

Параметры r и L - уже известные нам активное сопротивление и самоиндукция контуров, а M - максимальное значение взаимоиндукции между контурами, т.е. такое, когда магнитные оси контуров совпадают в пространстве.

Не обязательно для рассматриваемой машины принимать равенство $r_1 = r_2 ; L_1 = L_2$. Преобразование в явном виде существует и для более общего случая, когда $\frac{L_1}{r_1} = \frac{L_2}{r_2}$, т.е. при равенстве постоянных времени контуров статора и ротора. В этом случае структура матрицы преобразования такая же, как и в (9), но функции M_1 и M_2 имеют другой вид. Однако, если на значения параметров $r_1, r_2 ; L_1, L_2$ не накладывается никаких ограничений, то явное решение (во всяком случае точное) оказывается уже невозможным.

Указанная двухконтурная машина анализировалась в научной литературе, и для расчета процессов в ней получены достаточно простые соотношения, но эти соотношения справедливы применительно только к расчету установившихся процессов, тогда как формулы, полученные в диссертационной работе, применимы для расчета и любых переходных процессов.

К интересным результатам приводит и анализ второй задачи преобразования. Так, например, анализ условий (7) показывает, что для существования матрицы $|Z|$, удовлетворяющей первому условию (7), необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения

$$\det(|T| - \lambda \|e\|) = 0 \qquad \ldots(II)$$

были бы постоянными. Аналогично для существования матрицы $|Z|$, удовлетворяющей второму условию (9), необходимо и достаточно постоянство корней характеристического уравнения

$$\det\left(\frac{d}{d\gamma}|T| - \lambda \|e\|\right) = 0 \qquad \ldots(I2)$$

В уравнениях (I3) и (I4) матрица $\|e\|$ обозначает единичную матрицу. Можно получить и более простые критерии, но критерии типа отрицания: если справедливо, что детерминанты матриц $|T|$ и $\frac{d}{d\gamma}|T|$ непостоянны, т.е. зависят от угла поворота ротора относительно статора γ, что выражается соотношениями

$$\det|T| \neq const$$
$$\det\frac{d}{d\gamma}|T| \neq const \qquad \ldots(I3)$$

то не существует преобразования, удовлетворяющего условиям (7), а следовательно, уравнения (I) не могут быть сведены к форме (5).

Естественно, мы не можем ограничиться только критериями (II) - (I3). Нам необходимо иметь способ, позволяющий отыскать $|Z|$, если она существует. Проведенные исследования показали, что отыскание этой матрицы является несложной задачей и сводится к решению n однородных систем алгебраических уравнений вида

$$(|T| - \lambda_i \|e\|) \cdot |S_i| = 0 \qquad \ldots(I4)$$

где λ_i есть i-ый корень уравнения (II), а n - порядок квадратной матрицы $|T|$.

Оказывается, что матрица $|S|$, составленная из столбцов матриц $|S_i|$, удовлетворяет первому условию (7), а поэтому матрицу $|Z|$ мы можем определить как

$$|Z| = |S| \cdot |B| \; , \quad |B| = const \qquad \ldots(I5)$$

Матрица S как матрица, составленная из решений неоднородных систем (I4), содержит по меньшей мере n произвольных величин. Подставляя матрицу (I5) во второе условие (7) и выбирая эти произвольные постоянные так, чтобы второе условие соблюдалось, найдем окончательный вид искомой матрицы.

При отыскании матрицы (I5) путем решения уравнений (I4) мы будем иметь между старыми и новыми переменными самую общую и, естественно, не самую простую зависимость.

Вместе с тем важен и интересен случай, когда матрица $|Z|$ имеет такую структуру, что новые статорные переменные зависят только от старых статорных и новые роторные переменные зависят только от старых роторных. Этот случай преобразования также исследуется в диссертации. Для него найдены критерии существования и получены формулы для вычисления матрицы преобразования. Кроме того, исследовался вопрос существования ортогонального преобразования.

Наконец, проводился анализ преобразования выражений для мгновенной активной мощности, потребляемой электрической машиной, и электромагнитного момента. Показано, что для того, чтобы эти выражения в новых переменных не содержали гармонических коэффициентов, требуется соблюдение условия

$$|S|_r \cdot |Z| \cdot |S| = const \qquad ...(I6)$$

Исследование второй задачи преобразования привело к выводу, что существуют случаи электрической машины переменного тока (это те исключения, о которых упоминалось во введении) с несимметричными статором и ротором одновременно, но для которых все же существует преобразование, исключающее из исходных уравнений гармонические коэффициенты и приводящее эти уравнения к конечной форме (5). Причем это приведение не может быть получено применением ни одной из известных систем координат без соответствующих коррективов. Примером такой машины может служить машина с одним контуром на роторе и двумя взаимно перпендикулярными контурами на статоре, если параметры статорных контуров подчиняются условию $\frac{L_1}{Z_1} = \frac{L_2}{Z_2}$. Несмотря на последнее соотношение, машина и по ротору (только одна обмотка) и по статору ($L_1 \neq L_2$; $Z_1 \neq Z_2$) является несимметричной, тем не менее с помощью методов, изложенных в работе, можно достаточно просто получить уравнения такой машины в форме (5). Понятно, конечно, что аналогичным примером будет и машина с одним контуром на статоре и двумя взаимно перпендикулярными контурами на роторе. Только теперь уже параметры контуров ротора должны подчиняться условию $\frac{L_2}{Z_2} = \frac{L_3}{Z_3}$. Можно привести соответствующие примеры и для многоконтурных машин ($n \geq 3$).

Приведенный пример подробно рассматривается в диссертационной работе. Приводятся исходные и конечные уравнения, дается геометрическая трактовка найденного преобразования.

Глава Ш

Преобразование электромеханических уравнений неявнополюсных электрических машин переменного тока при условии симметрии ротора с целью построения алгоритма для расчета несимметричных режимов на ЦВМ

В настоящей главе ставится задача преобразования и упрощения уравнений конкретной электромеханической системы, содержащей электрическую машину определенного класса - электрическую машину с симметричным ротором. При этом вопрос об исключении гармонических коэффициентов не стоит, т.е. предполагается, что исходные уравнения системы уже не содержат гармонических коэффициентов (теми или иными способами они исключены). Зато имеются другие вопросы, в частности вопрос наиболее рационального способа приведения уравнений к канонической форме. Вопрос о приведении системы дифференциальных уравнений к канонической форме теоретически полностью решен. Казалось бы, трудности, связанные с таким приведением, заключаются лишь в вычислении определителей, порядок которых тем выше, чем выше порядок системы уравнений. Конечно, трудности были бы не так велики, если бы система исходных уравнений при расчете тех или иных процессов не меняла своей структуры. Однако для исследуемой в этой главе системы необходимо рассматривать несимметричные режимы различных типов (короткие замыкания, обрывы фаз). Для каждого вида короткого замыкания и для каждого вида обрыва фаз система уравнений имеет свою структуру, причем при переходе от одного вида аварийного режима к другому коэффициенты системы уравнений не просто изменяются – изменяется порядок системы. Это и вызывает трудности в приведении исходной системы к каноническому виду (приведение нужно осуществлять столько раз, сколько имеется расчетных аварий) и построении алгоритма для ЦВМ (фактически мы имеем столько же алгоритмов, сколько имеется расчетных аварий).

Таким образом, задача заключается в построении достаточно простого алгоритма для расчета несимметричных режимов системы, охватывающего заданное множество качественно различных аварий. Прежде всего о конкретном виде системы и конкретных видах аварий, которые затрагиваются в работе.

В главе исследуется электрическая машина с симметричным ротором, работающая через трансформатор и линию передачи на сеть бесконечной мощности. Предполагается, что сам по себе статор машины симметричен, а несимметрия статорных цепей создается за счет несимметрии внешних элементов системы, подключенных к статору. Что касается видов несимметрии, то рассматриваются такие (внешние по отношению к машине) виды несимметрии, как короткие замыкания и обрывы на линии передачи.

Задача преобразования уравнений указанной системы имеет практическое значение, в частности, при исследовании несимметричных режимов асинхронизированных синхронных машин.

Место несимметрии на линии обозначается точкой К, а количественно характеризуется коэффициентом K, определяемым по формуле

$$K = \frac{\ell_K}{\ell} \qquad \ldots(17)$$

где ℓ_K – длина участка линии от трансформатора до точки К, а ℓ – полная длина линии.

В точке несимметрии К вводится две системы напряжений U_K' и U_K'' – слева и справа от точки К. При несимметриях типа коротких замыканий такого разделения напряжений в точке несимметрии не требуется, ибо $U_K' = U_K''$, но при несимметриях типа обрывов оно обязательно. Трансформатор имеет соединение $\Delta/\curlywedge$ с соединением "треугольник" на стороне статора электрической машины, так что токи нулевой последовательности не обтекают обмоток статора.

Для указанной схемы при принятых условиях получены уравнения, описывающие процессы в системе в целом (система координат $\alpha, \beta, 0$). Эта система уравнений дополняется граничными условиями в точке несимметрии. Показано, что граничные условия для несимметрий первой группы (короткие замыкания) имеют вид:

$$|U_K'| = |U_K''|, \quad |M|\,|I'| + |W|\frac{d}{dt}\left(|I'| - |I''|\right) = 0 \qquad \ldots(18)$$

где

$$|U_K'| = \begin{Vmatrix} U_{K\alpha}' \\ U_{K\beta}' \\ U_{K0}' \end{Vmatrix}, \quad |U_K''| = \begin{Vmatrix} U_{K\alpha}'' \\ U_{K\beta}'' \\ U_{K0}'' \end{Vmatrix}, \quad |I'| = \begin{Vmatrix} I_{K\alpha}' \\ I_{K\beta}' \\ I_{K0}' \end{Vmatrix}, \quad |I''| = \begin{Vmatrix} I_{K\alpha}'' \\ I_{K\beta}'' \\ I_{K0}'' \end{Vmatrix}$$

а для несимметрии второй группы (обрывы) они таковы:

$$\frac{d}{dt}|I'| = \frac{d}{dt}|I''|, \quad |P|\frac{d}{dt}|I'| + |Q|\left(|U'| - |U''|\right) = 0 \qquad \ldots(19)$$

Запись граничных условий в матричной форме оказывается очень удобной при рассмотрении многих задач несимметричных процессов. Удобной оказывается и запись граничных условий для токов в дифференциальной форме.

В соотношениях (18) и (19) матрицы $|M|, |W|, |P|, |Q|$ суть чисто числовые матрицы, структура и значения элементов которых зависят только от типа несимметрии. Например, для однофазного замыкания на землю имеем:

$$|M| = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad |N| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 2 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

а для обрыва одной фазы будет:

$$|P| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \end{vmatrix}, \quad |Q| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Полученная система уравнений и граничные условия (I8), (I9) составляют вместе полную систему, описывающую процессы при любой несимметрии, принадлежащей к указанным выше двум группам. Аналитическому решению эта система не поддается (в общем случае). Однако, если рассматриваются процессы при постоянстве скорости вращения ($S = const$), то система принимает вид линейной системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Трудности ее решения связаны в этом случае лишь с отысканием корней характеристического уравнения, имеющего высокую степень. В том же случае, если желательно рассмотреть установившиеся несимметричные процессы при постоянстве скорости вращения, с успехом может быть применен комплексный метод.

В общем случае переходного процесса решение указанной системы уравнений может быть найдено либо методами численного интегрирования на ЦВМ, либо с помощью математического моделирования на аналоговых машинах.

Выше указывалось, что полная система уравнений в зависимости от вида аварии изменяет свою структуру, что определяется различием граничных условий несимметрии (I8) и (I9) и отражается на порядке системы уравнений. Для построения алгоритма, охватывающего качественно различные виды несимметрии, в работе предложен метод разбиения первоначальной системы уравнений на определенные части с последующим разрешением относительно производных каждой части системы самостоятельно. При таком разбиении оказывается, что задача представления системы в каноническом виде упрощается, а связь между переменными, входящими в различные части, на которые разбита система, уже не являются дифференциальными. Этот метод позволяет построить достаточно простой общий для всех рассматриваемых видов несимметрии алгоритм. Один из его возможных вариантов приводится в диссертационной работе.

Глава IУ

Эквивалентное представление электрической машины с симметричным ротором при наличии внешней несимметрии статорной цепи

Уравнения гл.Ш дают точное решение задачи при принятых условиях идеализации электрической машины (см. гл.I), однако практически достаточно приближенное решение, которое обеспечивает заданную точность. Если иметь в виду приближенное решение задачи, то можно на основе дополнительных допущений получить и более простую систему уравнений и более простой алгоритм. Часто при решении уравнений систем, содержащих электрические машины, пренебрегают активными сопротивлениями статорных цепей и переходными процессами в этих цепях, что позволяет существенно снизить порядок исходных уравнений. Однако при несимметриях в статорной цепи даже после такого упрощения система уравнений оказывается сложной.

В целях дальнейшего упрощения обычно внешнюю несимметричную часть статорной цепи эквивалентируют, применяя соотношения метода симметричных составляющих, симметричной цепью (схема прямой последовательности). Такое симметрирование сразу же позволяет применить преобразования Парка - Горева и свести исходные уравнения при несимметрии к удобной для расчета процессов на ЦВМ форме. В совокупности пренебрежение активными сопротивлениями статорной цепи и использование соотношений метода симметричных составляющих с последующим преобразованием по Парку - Гореву приводят к весьма простой схеме замещения статорной цепи при внешних несимметриях, которая для любого вида несимметрии описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, а количественно характеризуется всего двумя параметрами - эквивалентным внешним сопротивлением x_g и коэффициентом ξ , определяющим величину внешнего напряжения. Эта схема замещения обладает еще и тем свойством, что фиктивные контуры в осях α и β не имеют непосредственной магнитной связи, т.е. являются взаимно перпендикулярными (они магнитосвязаны косвенно - через контуры ротора). Естественно, что поскольку эквивалентная статорная цепь симметрична, применение именно системы координат α, β не обязательно. Уравнения эквивалентной статорной цепи и цепей ротора можно записать и в осях ротора ($d,q; f,b$ и т.п.). Следует, однако, остановиться на вопросе о правомерности указанного эквивалентирования по методу симметричных составляющих.

Известно, что метод симметричных составляющих, как базирующийся на принципе суперпозиции, применим только к линейным цепям. При постоянстве скорости вращения ротора электрической машины уравнения машины суть линейные, а следовательно, метод симметричных составляющих является корректным. Вместе с тем такую эквивалентную схему применяют и для расчета электромеханических переходных процессов, когда скорость ротора переменна, а система дифференциальных уравнений необходимо дополняется нелинейным уравнением механического движения ротора. Становится нелинейной и система контурных уравнений, поскольку входящий в нее множитель $\dot{\gamma}$ становится неизвестной переменной. Таким образом, применение соотношений метода симметричных составляющих при расчете электромеханических переходных процессов является теоретически некорректным. Однако накопленный опыт использования такого теоретически некорректного метода в расчетах несимметричных режимов в энергосистемах показывает, что теоретические и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются. Это можно объяснить тем, что механические постоянные инерции электрических машин, работающих в энергосистемах, больше электрических постоянных времени контуров системы.

При этом фактически нелинейные дифференциальные уравнения можно рассматривать как квазилинейные. Метод симметричных составляющих применительно к квазилинейным уравнениям дает малоощутимую погрешность.

Далее необходимо отметить, что существует еще один недостаток эквивалентирования по методу симметричных составляющих. Этот метод оперирует с такими величинами, как сопротивления прямой и обратной последовательности. Так как электрические машины являются регулируемыми объектами, то указанные параметры будут обобщенными в том смысле, что они относятся к машине и ее системе регулирования в целом. При исследовании поведения электрической машины, регулируемой по различным законам, мы часто без дополнительных расчетов или соответствующего эксперимента не будем знать, какие значения нужно приписать параметрам прямой и обратной последовательности, что является неудобным. Кроме того, может случиться, что в тех или иных режимах переменные, описывающие поведение системы регулирования, попадают в области ограничений. Тогда система регулирования становится нелинейной, что просто исключает возможность приписать сопротивлениям прямой и обратной последовательности какие-либо значения.

Третьим недостатком метода симметричных составляющих является то, что расчет процесса по схеме замещения прямой последовательности не дает полной информации о токах и напряжениях, действующих в цепях системы. Для получения полной информации требуется дополнительно рассчитать процессы в схеме замещения обратной последовательности.

Сказанное заставляет искать иную схему замещения статорных цепей в условиях несимметрии, не базирующуюся на методе симметричных составляющих, но аналогичную по простоте указанной схеме.

Исследования, проведенные в главе, показали, что для электрических машин с симметричным ротором такую схему действительно можно построить. При построении новой схемы приходится отказаться от того, что величины x_g и ξ одинаковы для осей α и β и ввести четыре параметра - x_{α}, x_{β}, ξ_{α}, ξ_{β}

Эта схема замещения практически так же проста, как и схема прямой последовательности. Фиктивные контуры статора здесь так-

же являются взаимно перпендикулярными. В главе доказывается, что схема теоретически корректна при расчетах любых переходных процессов - как электрических, так и электромеханических, т.е. не вносит погрешностей, связанных с непостоянством скорости вращения ротора. Параметры этой схемы x_{α}, x_{β}, ξ_{α} и ξ_{β} (в противовес параметрам x_g и ξ) не зависят от закона регулирования. Схема позволяет получить без дополнительных расчетов полную информацию о токах и напряжениях в контурах системы.

Таковы преимущества новой схемы; недостаток новой схемы заключается в том, что она неприменима к электрическим машинам с несимметричным ротором. Иначе говоря, уравнения, соответствующие новой схеме, справедливы только в координатной системе, жестко связанной со статором (α, β; γ, δ или их модификации).

Итак, если схема замещения прямой последовательности описывается уравнениями вида

$$\xi \begin{Vmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} x+x_g & 0 \\ 0 & x+x_g \end{Vmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Vmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{Vmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{Vmatrix} e_{\alpha} \\ e_{\beta} \end{Vmatrix} \quad ...(20)$$

то для новой схемы замещения имеем:

$$\begin{Vmatrix} \xi_{\alpha} & 0 \\ 0 & \xi_{\beta} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} x+x_{\alpha} & 0 \\ 0 & x+x_{\beta} \end{Vmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Vmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{Vmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{Vmatrix} e_{\alpha} \\ e_{\beta} \end{Vmatrix} \quad ...(21)$$

В работе выводятся формулы для расчета параметров x_{α}; x_{β}; ξ_{α}; ξ_{β} при всех видах несимметрии, рассмотренных в гл.III. Так, например, при междуфазном замыкании имеем:

$$x_{\alpha} = x_{r} + Kx_{1}, \quad x_{\beta} = x_{r} + x_{1}, \quad \xi_{\alpha} = 0, \quad \xi_{\beta} = 1 \quad ...(22)$$

а для двухфазного замыкания на землю получим:

$$x_\alpha = x_T + Kx_л;\quad x_\beta = x_T + Kx_л + 2(1-K)x'_{лэ};\quad \xi_\alpha = 0,\quad \xi_\beta = \frac{2x'_{лэ}}{(1-K)x_л}$$

$$x'_{лэ} = \frac{\frac{1}{2}(1-K)x_{лэ}(x_T + Kx_{л0})}{x_T + Kx_{л0} + \frac{1}{2}(1-K)x_{лэ}};\quad x_{лэ} = \frac{2x_л \cdot x_{л0}}{x_л + 2x_{л0}} \qquad ...(23)$$

где x_T - сопротивление трансформатора, $x_л$ - сопротивление линии, $x_{л0}$ - сопротивление нулевой последовательности линии, а К - коэффициент, рассчитанный по формуле (I7).

Простота эквивалентных уравнений (2I) позволяет в некоторых частных случаях получить приближенные аналитические решения для переходных процессов. Один из таких примеров, когда в системе работает асинхронизированная синхронная машина, регулируемая по методу полной компенсации, рассмотрен в работе.

Глава У

Анализ результатов расчетов, проведенных на ЦВМ .

На основе метода эквивалентирования статорных цепей, разработанного в гл.IУ, был построен простой алгоритм расчета несимметричных режимов в системе "генератор - трансформатор - линия - мощная сеть" на цифровой вычислительной машине (ЦВМ). Этот алгоритм обладает определенной универсальностью, заключающейся в том, что он допускает расчеты несимметричных режимов и по методу симметричных составляющих. Последнее обстоятельство дает возможность весьма простого сравнения метода гл.IУ настоящей работы с методом симметричных составляющих.

Такое сравнение было проведено для двухфазного короткого замыкания на землю в начале линии передачи (на ответвлении).

Принималось, что генератор работал в асинхронизированном режиме и регулировался по методу полной компенсации. При указанном законе регулирования параметры прямой и обратной последовательности в случае расчета процессов по методу симметричных составляющих отыскиваются просто, на основе теоретических рассуждений.

Сравнение расчетов, проведенных теоретически с помощью метода гл.IУ,и расчетов на ЦВМ, проведенных по методу симметричных составляющих, показало, что практически расхождение отсутствует. Однако теоретически метод полной компенсации в реальной системе реализовать трудно, да и в этом нет особой необходимости, так как для практических целей подходит паллиативное решение, заключающееся во введении в закон регулирования отрицательных обратных связей по токам контуров ротора с некоторым коэффициентом K_e , зависящим от параметров рассматриваемой машины.

При наличии метода неполной компенсации определение параметров прямой и обратной последовательности (как функции K_e) для динамических процессов осуществить практически невозможно. При помощи ЦВМ это можно сделать на основании целой серии дополнительных расчетов. Такие расчеты были проведены и показали нецелесообразность применения метода симметричных составляющих и преимущество метода эквивалентирования гл.IУ.

Д О П О Л Н Е Н И Е

О динамической устойчивости электрической машины с симметричным двухфазным ротором при одновременной форсировке напряжений в обеих осях ротора

В дополнении к диссертационной работе исследована одна интересная с теоретической и практической точек зрения возможность существенного повышения динамической устойчивости генератора, имеющего симметричный двухфазный ротор. У такого генератора, как известно, электрический (диаграммный) угол θ ,определяющий положение э.д.с. по отношению к вектору напряжения мощной сети $\bar{U}_c$, т.е. режим машины не зависит от механического угла δ , характеризующего положение ротора генератора относительно того же вектора $\bar{U}_c$. Отсюда следует, что если мы в некоторый момент времени подадим на обмотки ротора в осях d и q потолочные (форсировочные) значения напряжений, то, во-первых, получим максимальное эквивалентное значение U_f по модулю, а во-вторых, сможем обеспечить любое наперед заданное положение эквивалентного вектора $\bar{U}_f$ относительно вектора $\bar{U}_c$ (поскольку имеем возможность поставить ротор генератора до момента форсировки в любое положение относительно вектора $\bar{U}_c$). Рассмотрим доаварийный (установившийся), аварийный (скажем, короткое замыкание) и послеаварийный (восстановление исходной схемы системы) режимы.

Имея возможность обеспечить в установившемся режиме любое положение ротора, определяемое механическим углом δ_0 , мы можем так подобрать значение δ_0 , что при подаче форсировки в обе оси ротора в момент аварии получим в послеаварийном процессе максимальный тормозной эффект.

Эта идея, принадлежащая М.М.Ботвиннику, была исследована автором при помощи ЦВМ, а также теоретически на основе известного энергетического принципа- принципа площадей.

Расчеты показывают, что, например, для синхронного генератора с симметричным двухфазным ротором время аварии по сравнению с обычным синхронным генератором может быть увеличено на

25-30%. Теория качественно правильно объясняет результаты, полученные расчетным путем.

Выводы

Результаты, полученные в реферируемой работе, можно изложить следующим образом:

I. Поставлена и исследована общая задача исключения гармонических коэффициентов из системы уравнений электрической машины переменного тока, причем показано, что разрешимость или неразрешимость этой задачи зависит от конечного вида системы уравнений.

2. Получено доказательство того, что исходные электромеханические уравнения любой электрической машины переменного тока принципиально могут быть приведены к уравнениям с постоянными коэффициентами. Вместе с тем этот резельтат имеет лишь теоретическое значение, поскольку вычисление соответствующей матрицы преобразования в квадратурной форме, как правило, невозможно.

3. Показано, что исключения существуют,и для представляющего некоторый интерес случая машины, имеющей один контур на статоре и один на роторе (при равенстве их параметров) получена матрица преобразования, приводящая исходные уравнения к уравнениям с постоянными коэффициентами.

4. Найдены критерии, позволяющие определить, приводится ли система уравнений данной электрической машины к уравнениям типа Парка - Горева или нет. Для тех случаев,когда критерии показывают, что такое приведение возможно, построен общий метод вычисления соответствующей матрицы преобразования.

5. Разработан общий алгоритм для расчета несимметричных режимов машины с симметричным ротором, работающей через линию пере-

дачи на сеть бесконечной мощности. При построении алгоритма предложен удобный метод представления системы уравнений в канонической форме.

6. Получена матричная форма записи граничных условий при внешних несимметриях, удобная при исследованиях.

7. Построена новая схема замещения статорных цепей электрической машины с симметричным ротором при внешних несимметриях.

8. Доказано, что правомерно использовать такую схему для расчета электромеханических переходных процессов (процессов при переменной скорости движения ротора, когда схема замещения, основанная на методе симметричных составляющих, является теоретически некорректной). Обоснованы и другие преимущества построенной схемы замещения.

9. Для новой схемы выведены формулы, позволяющие для любого вида несимметрии рассчитать ее параметры. Простота новой схемы позволила получить и аналитические соотношения для расчета процессов при внешней несимметрии в цепи статора асинхронизированной синхронной машины, управляемой по методу полной компенсации.

10. Исследован вопрос о динамической устойчивости генератора с симметричным ротором при форсировке напряжений, подведенных к обмоткам ротора машины в момент аварии, при оптимальном положении ротора генератора в доаварийном режиме. Показано, что эта форсировка может существенно увеличить динамическую устойчивость такого генератора.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих статьях:

1. Н.Н.Блоцкий – Преобразование электромеханических уравнений электрических машин переменного тока. Сборник Трудов ВНИИЭ, XLI, 1971.
2. Н.Н.Блоцкий – Эквивалентное представление статорных цепей электрической машины в условиях внешней несимметрии. Сборник Трудов ВНИИЭ, XLI 1971.
3. Н.Н.Блоцкий, Ю.Г.Шакарян, М.С.Фези-Жилинская – Алгоритм расчетов переходных процессов асинхронизированных синхронных машин на ЦВМ. Сборник Трудов ВНИИЭ, XLI 1971.
4. M.M.Botvinik, J.G.Sakarjan, N.N.Blocki – Osnove teorije asinhroniziranih sinhronskih strojev. p.I. „Automatika" №1, 1965e, Zagreb
5. M.M.Botvinik, J.G.Sakarjan, N.N.Blocki – Osnove teorije asinhroniziranih sinhronskih strojev. p.II. „Automatika" №2, 1965 Zagreb
6. Н.Н.Блоцкий, Ю.Г.Шакарян – Сравнение законов регулирования возбуждения асинхронизированных синхронных машин в установившемся режиме. "Электротехника", 1963, №9.