

Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

К ВОПРОСУ УЧЕТА НАСЫЩЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

При анализе переходных электрохимических и электромагнитных переходных процессов одним из наиболее важных является выбор адекватной математической модели синхронного генератора. В общем случае подходы к моделированию делятся на два вида. С целью подробного анализа систем автоматического регулирования генератора создается подробная математическая модель, учитывающая все контуры регулирования, их характеристики и физические свойства машины. Однако такой подход оправдан для подробного исследования отдельной машины. При анализе режимов сложных промышленных систем электроснабжения чрезмерная детализация процессов, порой не имеющая значения для исследования режимов сети, существенно усложняет процесс моделирования и приводит к увеличению длительности расчета. С целью анализа длительных переходных электрохимических процессов генератор рекомендуется задавать упрощенно неизменными переходными величинами. Однако такой подход может приводить к погрешности расчета. Одной из причин этого является изменение собственных сопротивлений генератора, поскольку изменения токов и напряжений вызывают изменение уровня насыщения машины, в том числе ее отдельных частей. Таким образом, при расчете электрохимических и электромагнитных процессов синхронного генератора следует учитывать не только внешние характеристики регуляторов возбуждения и скорости с соответствующими постоянными времени, но и изменение переходных сопротивлений, оказывающих влияние на токи в аварийном и послеаварийном режимах, а также на величины вращающих электромагнитных моментов, определяющих небаланс мощностей на валу. Учет изменения сверхпереходных, переходных и синхронных индуктивных сопротивлений с учетом насыщения машины в режиме короткого замыкания предполагается произвести при разработке программного комплекса расчета и анализа переходных электрохимических режимов. Расчеты показали, что учет изменения переходного сопротивления оказывает существенное влияние на токи в момент отключения повреждения и синхронизации генератора с сетью. Разработанная математическая модель позволит более корректно определять токи при длительных коротких замыканиях и их отключениях в сетях сложной конфигурации.

Ключевые слова: переходное сопротивление, промышленный синхронный генератор, короткое замыкание, переходный электрохимический режим, программное обеспечение, автоматический регулятор возбуждения, насыщение синхронной машины, электрическая удаленность, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамической устойчивости электроэнергетических систем является важной задачей и требует учета большого количества факторов. С другой стороны, использование подробных математических моделей синхронных генераторов может существенно увеличивать длительность расчета и перегружать его без необходимости. Анализ динамической устойчивости синхронных генераторов электроэнергетических систем посвящены работы как отечественных, так и зарубежных ученых [1-6]. В настоящее время исследования в данной области направлены на разработку мероприятий по улучшению устойчивости энергосистем [7-11]. Отдельной задачей является повышение устойчивости работы протяженных линий электропередачи [12]. Также в ряде работ описываются дополнительные технические средства, позволяющие повысить устойчивость энергосистемы в целом или отдельной электропередачи [13-15].

При создании математических моделей синхронных генераторов для исследования переходных процессов в общем случае можно выделить два подхода. Первый, предусматривающий подробный учет систем регулирования и технических характеристик, необходим для задач электропривода конкретной машины. Второй подход предназначен для анализа переходных процессов крупных энергосистем, имеющих в своем

составе большое количество электростанций. В этом случае генератор представляется внешними характеристиками с упрощенным учетом постоянных времени регуляторов и объединением группы генераторов в один эквивалентный. Такой подход не вполне применим для сложносвязанных промышленных систем электроснабжения, в которых генераторы имеют мощности, соизмеримые с отдельными электроприемниками, и являются электрически удаленными относительно друг друга. Вопросам математического моделирования промышленных генераторов посвящены труды [16-22]. В случае сложной конфигурации сети и высоких напряжениях могут иметь место сложные электрохимические переходные процессы, зависящие от действия релейной защиты и автоматики [23, 24]. Учет нагрузок промышленных сетей, которые могут быть электрически близкими к генераторам и оказывать непосредственное влияние на динамическую устойчивость, посвящены труды [25, 26]. Отдельными задачами при исследовании устойчивости является представление линий электропередачи [27-29], а также учет возможности аварийного отключения нагрузки [30].

Одним из наиболее важных этапов при анализе устойчивости энергосистем является выбор корректной математической модели генератора. При анализе переходных процессов в энергосистемах часто рекомендуют генератор представлять переходной или сверхпереходной ЭДС за неизменным переходным или сверхпереходным сопротивлением [1]. При этом не учитывается изменение насыщения машин при дли-

тельных глубоких провалах напряжения, которые не вполне ликвидирует также действие АРВ. Данная работа посвящена влиянию изменения сопротивлений машины в переходных режимах на его параметры.

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА

Математическое описание сложной электроэнергетической системы основывается на уравнениях различных элементов системы. Синхронные генераторы являются одними из наиболее сложных элементов, поэтому необходимо знать их точные параметры. Это позволяет определить поведение машины при различных возмущениях, например коротких замыканиях. Определение параметров синхронного генератора является ответственной задачей. В то же время нужно максимально просто, наглядно и корректно суметь описать переходные процессы, возникающие в машине посредством внешних возмущений, что, в свою очередь, определяет качественное и успешное воздействие на машину в ряде аварийных случаев в электроэнергетической системе. Вопросы точного и несложного описания процессов и изменения параметров машины очень остры и актуальны на сегодняшний день, поскольку это связано с высокими требованиями к устойчивости систем и экономическим показателям.

Вопросам математического моделирования синхронных генераторов в переходных и сверхпереходных режимах посвящено большое число трудов. Так, в работе Жданова П.С. [1] дается характеристика сверхпереходным и переходным режимам, в частности рекомендуется при длительных электромеханических процессах турбогенератор, в том числе при действии АРВ, представлять переходной ЭДС за неизменным сверхпереходным сопротивлением. Подробная характеристика переходных процессов синхронного генератора приводится в трудах Адкинса Б. [3], Казовского Е.Я. [4], Ковача К.П., Раца И. [2]. В работе Кимбарка Э. [5] подробно описан физический смысл переходных и сверхпереходных ЭДС, сопротивлений и постоянных времени турбогенераторов и приведены принципы их математического моделирования применительно к методам численного интегрирования.

На кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова разработан программный комплекс «КАТРАН» для расчет электромеханических переходных процессов. В его основу положены методы последовательного эквивалентирования и последовательных интервалов. Математические модели и принципы исследования статической и динамической устойчивости в данном программном комплексе изложены в трудах [16, 18, 19].

В современной литературе при использовании методов численного интегрирования для исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов для расчета токов КЗ синхронный генератор без демпферных контуров представляется переходной ЭДС, определенной из начального установившегося режима, за переходным сопротивлением. Такой подход справедлив для расчета периодической составляющей тока КЗ в начальные несколько периодов. Далее начинают изменяться как переходная ЭДС, так и переходное сопротивление. Изменению переходной ЭДС по-

священо значительное количество трудов. Что касается переходного сопротивления, то в имеющейся литературе данный вопрос глубоко освещается довольно редко [2]. Как правило, приводится рекомендация пользоваться переходным сопротивлением, неизменным во времени, в частности при работе АРВ. Однако во время длительных переходных электромеханических и электромагнитных процессов переходное сопротивление не остается неизменным вследствие изменения пути замыкания соответствующих магнитных полей, а также вследствие изменения насыщения магнитопроводов. Нормальный режим работы синхронного генератора относят к насыщенным, в справочной литературе приводят все сопротивления для насыщенного состояния, имея в виду, что из данного состояния генератор переходит в режим короткого замыкания. В режиме КЗ состояние машины изменяется [2] и режим установившегося КЗ относят к ненасыщенным.

Согласно [2], если происходит электрически близкое к синхронному генератору КЗ, то резко повышаются токи в обмотке статора и, следовательно, для соблюдения принципа постоянства потокоцепления в обмотке возбуждения. При этом в воздушном зазоре имеет место небольшая суммарная намагничивающая сила, и в целом машину можно считать ненасыщенной. При этом переходное сопротивление по сути характеризует магнитное сопротивление суммарному магнитному потоку, который вытесняется к полюсным наконечникам машины. Магнитное сопротивление растет, индуктивное падает. В последующие моменты КЗ поток реакции статора начинает проявляться и результирующий поток обмотки возбуждения начинает замыкаться в большей степени по магнитопроводу ротора. Магнитное сопротивление снижается, индуктивное растет. Кроме пути замыкания потоков на величину индуктивного сопротивления оказывает влияние магнитная проницаемость стали, которая снижается при больших токах короткого замыкания как у статора, так и у ротора. Как показали эксперименты [2], отношение насыщенных к ненасыщенным величинам переходных реактивных сопротивлений составляет 1:1,8. Таким образом, при точном исследовании длительных электромеханических процессов необходимо учитывать изменение индуктивного переходного сопротивления. Постоянная времени изменения данного сопротивления зависит от характеристик обмотки ротора и может быть определена по справочной литературе с учетом электрической удаленности.

При наличии демпферных обмоток или массивного ротора на начальное изменение периодического тока КЗ обмотки статора реагирует демпферная обмотка и режим считается сверхпереходным. В этом случае в практических расчетах КЗ генератора в схему замещения вводится неизменная сверхпереходная ЭДС за неизменным сверхпереходным сопротивлением. Фактически оба данных параметра будут изменяться. Так, изменение ЭДС будет обусловлено снижением суммарного магнитного потока из-за проявившейся реакции статора, сверхпереходное сопротивление по мере насыщения машины и изменения пути замыкания соответствующего магнитного потока также будет изменяться. Суммарный магнитный поток обмотки возбуж-

дения при наличии демпферной будет замыкаться изначально в воздушном зазоре и постепенно вытесняться в ротор. В связи с этим, согласно [2], сверхпереходное сопротивление насыщенного и ненасыщенного турбогенератора составляет 1:2. Постоянная времени, соответствующая затуханию сверхпереходного тока, также зависит от электрической удаленности КЗ и может быть скорректирована при расчете режима.

Синхронное индуктивное сопротивление синхронного генератора также зависит от степени насыщения магнитопроводов и изменяется при длительном переходном процессе. Поскольку данное сопротивление определяется потоками рассеяния и реакции статора, то снижение магнитной проницаемости стали сердечника при протекании больших токов статора приводит к снижению сопротивления реакции статора и, следовательно, к снижению синхронного индуктивного сопротивления в ненасыщенном состоянии машины, таком как длительное КЗ. Из справочной литературы данное сопротивление можно определить как величину, обратную ОКЗ. Постоянная времени затухания синхронного индуктивного сопротивления может быть принята аналогичной переходной ЭДС, учитывающей скорость проявления реакции статора.

Электрическая удаленность в общем случае может быть определена из расчета сверхпереходного режима. В данной работе расчет сверхпереходного режима сложноразомкнутой сети ведется методом последовательного эквивалентирования. Причем действие АРВ может быть учтено по ходу расчета переходного процесса с коррекцией на каждом шаге, так как при этом изменяется напряжение на выводах обмотки статора, определяющее согласно [2] насыщение машины. Более грубо действие АРВ может быть учтено при расчете установившегося режима КЗ.

Особый интерес представляет режим отключения КЗ и переход синхронного генератора в послеаварийный режим. В этом случае в первый момент отключения возможно различное положение ротора относительно вращающегося магнитного поля статора, то есть повторное включение может быть несинхронным. Причем при угле ротора, близком к 180 эл. град, токи в обмотках статора могут превышать токи КЗ. Поэтому в таком режиме сначала также задействуется демпферная обмотка, то есть переходный процесс следует рассматривать как сверхпереходный, затем токи в демпферной обмотке затухают, суммарный магнитный поток обуславливается взаимодействием потоков реакции статора и обмотки возбуждения с учетом АРВ.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»

Реализация данной математической модели предполагается в программном комплексе «КАТРАН». При этом для расчета установившихся и начальных сверхпереходных режимов, а также для расчета промежуточного режима на каждом шаге используют метод последовательного эквивалентирования. Расчет переходного режима предполагается осуществлять методом последовательных интервалов, причем возможен любой из методов численного интегрирования. При таком подходе появляется возможность оценки электрической удаленности КЗ и действия АРВ.

Объектом исследования является турбогенератор ТВС-32-УЗ, мощность которого характерна для заводских теплоэлектроцентралей. Для данной машины было осуществлено построение семейств графиков для по алгоритму, описанному в блок-схеме (рис. 1). На рис. 1 приведены следующие обозначения: ОКЗ – отношение короткого замыкания, о.н.е.; x_d, x'_d, x''_d – синхронное индуктивное, переходное и сверхпереходное сопротивления, о.н.е.; T'_{d0}, T''_{d0} – постоянные времени синхронной машины при разомкнутой обмотке статора при наличии и отсутствии демпферных контуров, с; T'_d, T''_d – переходная и сверхпереходная постоянные времени синхронной машины при замкнутой обмотке статора, с; T_a – постоянная времени обмотки статора, с; x – внешнее сопротивление от генератора до точки короткого замыкания; X_d, x', x'' – текущие значения синхронного индуктивного, переходного и сверхпереходного сопротивлений в режиме КЗ, о.н.е.; $X_{d\text{откл}}, x'_{\text{откл}}, x''_{\text{откл}}$ – текущие значения синхронного индуктивного, переходного и сверхпереходного сопротивлений после отключения КЗ, о.н.е.; $x_{d\text{ненас}}, x'_{d\text{ненас}}, x''_{d\text{ненас}}$ – значения синхронного индуктивного, переходного и сверхпереходного сопротивлений в установившемся режиме КЗ, о.н.е.

В качестве исходных данных задаются технические характеристики генератора. Далее для построения характерных кривых задаются внешние индуктивные сопротивления x , характеризующие электрическую удаленность точки КЗ. Для вышеуказанного генератора при выбранной длительности КЗ и различной его удаленности были определены зависимости переходного, сверхпереходного и индуктивного сопротивлений во времени. Так, при трехфазном КЗ на выводах синхронного генератора индуктивное сопротивление изменяется согласно кривым, приведенным на рис. 2. При учете внешнего сопротивления, в 2 раза превышающего номинальное сопротивление машины, кривые примут вид, показанный на рис. 3.

Данный алгоритм был использован при разработке программного комплекса «КАТРАН», предназначенного для анализа установившихся режимов и переходных электромагнитных и электромеханических процессов. Исследование переходных режимов при учете и неучете насыщения производили на примере турбогенератора номинальной мощностью 12 МВт. Исследовали режим трехфазного КЗ длительностью 0,5 с и последующим отключением. Изменение действующих значений токов статора приведено на рис. 4, 5. Знак тока статора принят в зависимости от направления активной мощности генератора.

В режиме КЗ за счет изменения пути магнитного сопротивления суммарному магнитному потоку индуктивное сопротивление растет и после отключения КЗ генератор подключается к сети с большими переходными и сверхпереходными сопротивлениями. Следовательно, скачек тока при ресинхронизации снижается. Таким образом, учет насыщения при расчете длительных электромеханических процессов позволяет более точно оценить режимы и разработать мероприятия по обеспечению динамической устойчивости синхронных генераторов.

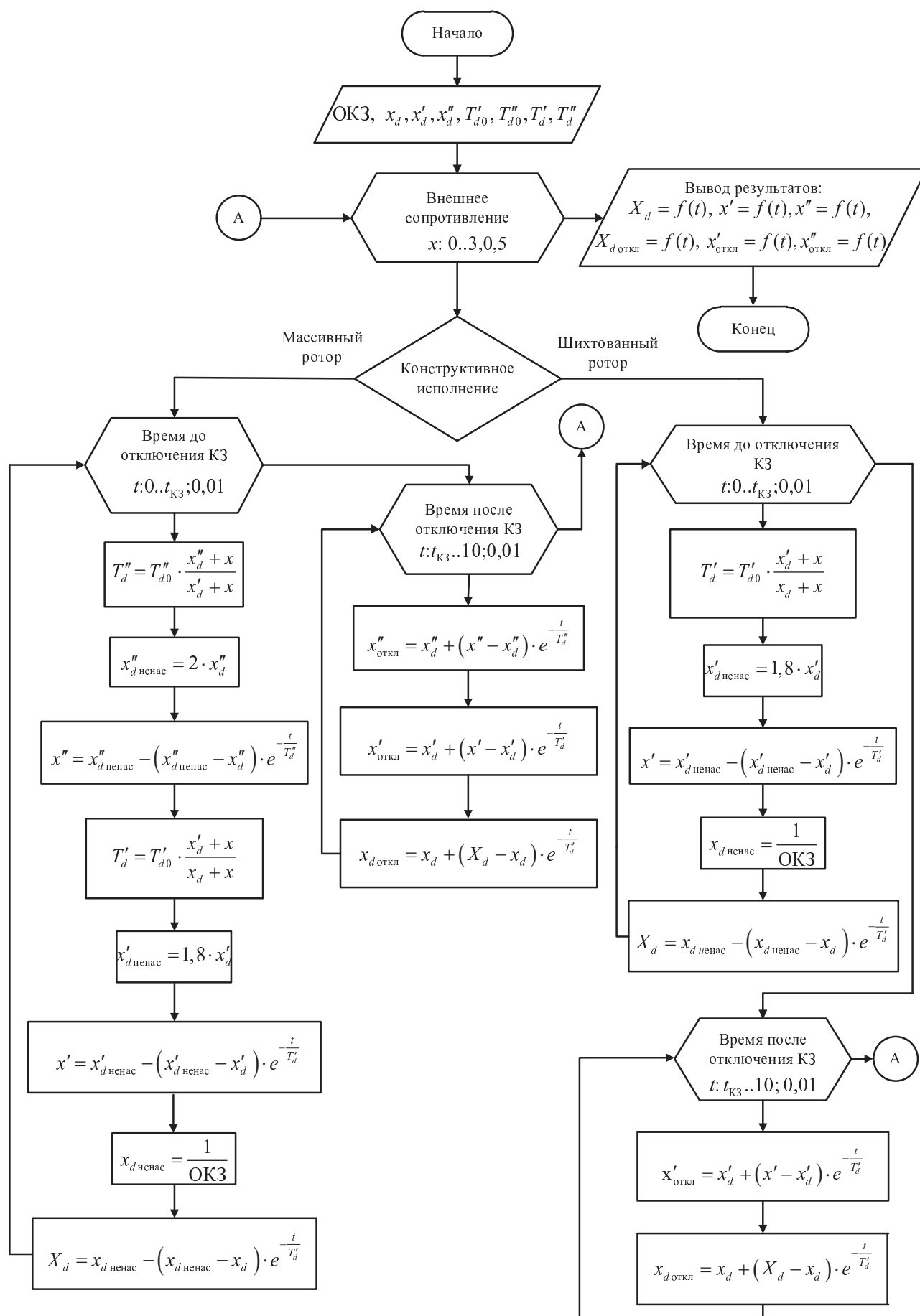


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений

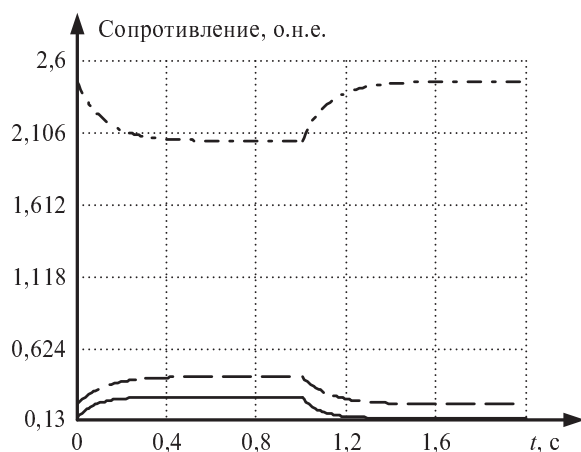


Рис. 2. Изменение сопротивлений во времени при КЗ на выводах генератора

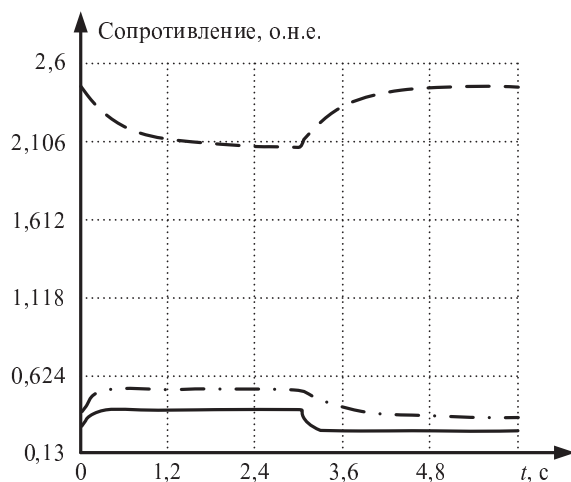


Рис. 3. Изменение сопротивлений во времени при электрически удаленном КЗ

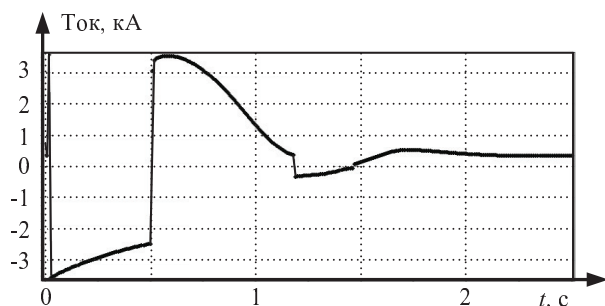


Рис. 4. Зависимость тока статора от времени без учета насыщения

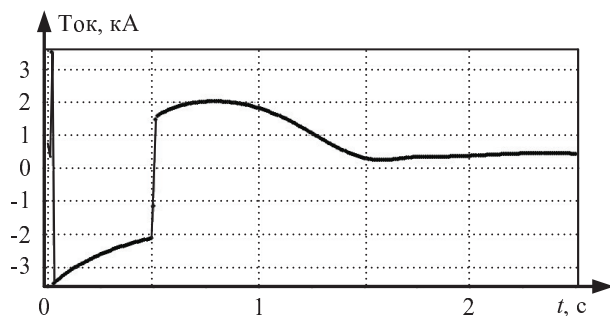


Рис. 5. Зависимость тока статора от времени с учетом насыщения

Таким образом, при исследовании длительных электромеханических переходных процессов в промышленных системах электроснабжения сложной конфигурации для повышения точности полученных результатов необходим учет насыщения и его влияния на все три сопротивления синхронного генератора: синхронное, переходное и сверхпереходное.

Нормальный режим работы синхронного генератора близок к насыщенному, поэтому все величины в справочной литературе приводятся для насыщенного состояния. Режим короткого замыкания является ненасыщенным, что приводит к изменению величин указанных сопротивлений более чем на 30%.

Программный комплекс «КАТРАН» позволяет учесть насыщение при расчете переходных режимов с учетом удаленности точки короткого замыкания и тем самым повысить точность вычислений. Результаты расчета могут быть использованы при прогнозировании аварийных и послеаварийных режимов сложных промышленных систем электроснабжения, имеющих в своем составе синхронные генераторы, электрически удаленные относительно друг друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы устойчивости энергетических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
3. Адкинс Б. Общая теория электрических машин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 272 с.
4. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 625 с.
5. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
6. Power System Engineering / D.P. Kothari, I.J. Nagrath. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
7. Research on Measures to Improve Stability of the Power System / Shi Xiufeng, Mu Shiguang. Applied Mechanics and Materials, vol. 742 (2015), pp. 648-652.
8. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables / D. Hazarika. IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977-985.
9. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN / A. Satheesh, T. Manigandan // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38-47.
10. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique / Mohamed Boudour, Abdelhafid Hellal // The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 30, no. 1B.
11. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator / D. Harikrishna, N.V. Srikanth // TELKOMNIKA. vol. 10, no.1, March 2012, pp. 9-16.
12. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC / Er.S. Sujatha, Dr.R. Anitha, Dr.P. Selvan, Er.S. Selvakumar // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85-91.
13. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system / Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong // The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.

14. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Yosra Welhazi, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah // *Electrical Systems* 10-3 (2014): 276-291.
15. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization / Hirofumi Akagi, Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi, Hiroaki Sugihara, Takaaki Kai // *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no. 1, 2000.
16. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2008. № 17 (117). С. 72-74.
17. Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII Междунар. научной конференции молодых ученых; Новосибирский государственный технический университет, Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области*. 2015. С. 8-10.
18. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // *Промышленная энергетика*. 2010. № 4. С. 22-28.
19. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability / Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. // *Procedia Engineering*. 2015. T. 128. С. 759-763.
20. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / Буланова О.В., Малафеев А.В., Николаев Н.А., Ротанова Ю.Н., Панова Е.А. // *Электрика*. 2010. № 8. С. 24-26.
21. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Юманов М.С. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 5. С. 32-35.
22. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes / Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. // *Russian Electrical Engineering*. 2014. T. 85. № 12. С. 748-751.
23. Комплексная оценка эффективности токовых и дистанционных защит в сетях 110-220 кВ в условиях магнитогорского энергетического узла / Б.И. Заславец, В.А. Игumenцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2011. № 15. С. 14-21.
24. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Игumenцев В.А., Заславец Б.И., Николаев Н.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
25. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2011. № 4. С. 115-118.
26. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management / Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Сер. «International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015». 2016. С. 012056.
27. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models / Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. // *Procedia Engineering*. 2015. T. 129. С. 951-955.
28. Газизова О.В., Абдулхаликова А.А. Исследование пропускной способности питающих линий электропередачи крупного промышленного энергетического узла // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 2 (23). С. 48-52.
29. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization / Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.
30. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems / Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*. 2014. С. 1-6.

Поступила в редакцию 15 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SATURATION IN THE MATHEMATICAL MODEL INDUSTRIAL GENERATOR FOR CALCULATION OF TRANSITION MODE IN THE POWER COMPLEX CONFIGURATION

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Alexandr P. Sokolov

Student, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Alexey V. Malafeyev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

In the analysis of transient electromechanical and electromagnetic transients one of the most important things is the selection of the synchronous generator with adequate mathematical model. In general, the modeling approaches are divided into two types. For a detailed analysis of the automatic generator control system, the research group created a detailed mathematical model that takes into account all the control circuits, their characteristics and physical properties of the machine. However, this approach is justified for the detailed study of a single machine. In the analysis of complex industrial systems modes excessive detailed description of processes sometimes has no significance for the study network modes but significantly complicates the simulation process and increases the duration of the calculation. In order to analyze the long transient processes in the electromechanical generator, it is recommended to set simplistic transitional constant values. However, this approach can lead to calculation errors. One reason for this is the change in internal resistance of the generator because the change of currents and voltages cause a change in the saturation level of the machine including its individual parts. Thus, when calculating the electromechanical and electromagnetic processes synchronous generator, we should take into account the external characteristics of the excitation controller and velocity with the corresponding time constants but also the change of contact resistances affecting the currents in emergency and after emergency mode, and also the magnitude of rotating electromagnetic moments determining the balance of power on the shaft. Accounting for changes in excess transient, transient and synchronous inductive resistance in view of the machine in saturation mode, short circuit is expected to make in the development of software system to calculate and analyze transient electromechanical modes. Calculations have shown that taking into account the transient changes in resistance has a significant effect on the currents at the moment fault current generator and synchronization with the network. The developed mathematical model makes it possible to correctly detect the currents during long short circuits and disconnections in a complex configuration networks.

Keywords: contact resistance, industrial synchronous generator, short-circuit, transient electromechanical mode, software, automatic excitation regulator, saturation of the synchronous machine, electric remoteness, mathematical model.

REFERENCES

1. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Questions of stability of power systems]. Ed. L.A. Zhukov. Moscow: Energy, 1979. 456 p. (In Russian)
2. Kovach K.P., Raz J. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p. (In Russian)
3. Adkins B. *Obschaya teoriya elektricheskikh mashin* [Overall theory of electrical machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 272 p. (In Russian)
4. Kazovsky E.Y. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* [Transients in electric machines AC]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. 625 p. (In Russian)
5. Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 392 p. (In Russian)
6. Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
7. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015), pp. 648-652.
8. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977-985.
9. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38-47.
10. Boudour Mohamed, Hellal Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 30, no. 1B.
11. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*, vol. 10, no. 1, March 2012, pp. 9-16.
12. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85-91.
13. Zhang Rui, Xu Yan, Dong Zhao Yang, Wong Kit Po. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.
14. Welhazi Yosra, Guesmi Tawfik, Jaoued Imen Ben, Abdallah Hsan Hadj. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems* 10-3 (2014): pp. 276-291.
15. Akagi Hirofumi, Takahashi Kenji, Kobayashi Toshiaki, Sugihara Hiroaki, Kai Takaaki. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no. 1, 2000.
16. Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure. *Vestnik Yuzno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"]. 2008, no. 17 (117), pp. 72-74. (In Russian)
17. Achitayev A.A., Udalov S.N., Yumanov M.S. Increase of an inventory of adjusting ability of generators in power systems with distributed Generation. *Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchennykh* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering collection of scientific works of the VII International scientific conference of young scientists]. Novosibirsk State Technical University Interuniversity center of assistance of scientific and innovative activities of students and young scientists of the Novosibirsk region. 2015, pp. 8-10. (In Russian)
18. Bulanov O.V., Malafeev A.V., Rotanova Y.N., Tarasov V.M. Analysis of transient modes of power supply systems of industrial enterprises, having in its composition objects small energy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power]. 2010, no. 4, pp. 22-28. (In Russian)
19. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 128, pp. 759-763.
20. Bulanov O.V., Malafeev A.V., Nicolayev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of asynchronous power of the synchronous generators in calculations of electromechanical transient phenomena in case of the asymmetrical modes. *Elektrika* [Electrician]. 2010, no. 8, pp. 24-26. (In Russian)
21. Udalov S.N., Achitayev A.A., Yumanov M.S. Research of operation modes of wind power installation on the basis of electromagnetic transmission as a part of autonomous system Electrical power supply. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro.

- Electrical engineering, power industry, electrotechnical industry]. 2015, no. 5, pp. 32-35. (In Russian)
22. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 748-751.
 23. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Y.N., Panova E.A. Comprehensive evaluation of current and for the remote-shield networks 110-220 kV in terms of energy Magnitogorsk node. *Vestnik Yuzno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Energy]. 2011, no. 15, pp. 14-21. (In Russian)
 24. Igumenshev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Y.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releinoy zaschity v setyakh 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluating the effectiveness of relaying networks 110-220 kV power complex systems of industrial enterprises with their own power plants]. Magnitogorsk, Magnitogorsk Publ. State. Tehn. University Press, 2011. 141 p. (In Russian)
 25. Nikolaev N.A., Bulanov O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Y.N., Tarasov V.M. Qualification regulating rectification effect for load-defined division parameters established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 115-118. (In Russian)
 26. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Cep. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015". 2016, p. 012056.
 27. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 129, pp. 951-955.
 28. Gazizova O.V., Abdulkhalikova A.A. Bandwidth transmission lines feeding study of a large industrial energy hub. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 2 (23), pp. 48-52. (In Russian)
 29. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
 30. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014, pp. 1-6.

Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 40-47. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-40-47)

Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeyev A.V. Saturation in the Mathematical Model Industrial Generator for Calculation of Transition Mode in the Power Complex Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 40-47. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-40-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-40-47)