

СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Асанов А., магистр, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0186, email: Akmatbek96gmail.com

Акматов К., магистр, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0194

Абдикадиров Н., магистр, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0112

Аскарров Б., магистр, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0196, email: askarovaskarovaskatrov@gmail.com

Аннотация. Расчет токов короткого замыкания в основном на основе методологии международных стандартов IEC-60909 и ANSI / IEEE C37.010.1979. Эта методология, хотя он использует простые процедуры и различные предположения, обычно дает удовлетворительные результаты. Тем не менее, динамические инструменты такие как ATP / EMTP могут быть использованы для точного моделирования токов короткого замыкания. В этой статье влияние некоторых упрощение предположений о моделировании синхронного генератора в обоих стандартах

исследуется и различия между статический и динамический анализ, выделение случаев, где могут возникнуть значительные расхождения. Анализ включает в себя один или несколько генераторов, подключенных к изолированному или сетевому связанные топологии.

Ключевые слова: расчет короткого замыкания, IEC 60909, ANSI, ATP / EMTP моделирование.

STATIC AND DYNAMIC CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN SYNCHRONOUS GENERATORS

Asanov A., Master, KSTU named after I. Razzakova, 720044, Bishkek, 66 Aitmatova Ave., ORCID ID 0000-0001-8302-0186, email: Akmatbek96gmail.com

Akmatov K., Master, KSTU named after I. Razzakova, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatova Ave. 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0194

Abdikadirov N., Master, KSTU named after I. Razzakova, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatova Ave. 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0112

Askarov B., Master, KSTU named after I. Razzakova, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatova Ave. 66, ORCID ID 0000-0001-8302-0196, email: askarovaskarovaskatrov@gmail.com

Abstract. The calculation of short-circuit currents is mostly based on the methodology of the international standards IEC-60909 and ANSI / IEEE C37.010.1979. This methodology, although it utilizes simple procedures and various assumptions, usually provides satisfactory results. However, dynamic tools such as the ATP/EMTP can be used for the accurate simulation of short-circuit currents. In this paper the influence of some simplifying assumptions on the synchronous generator modeling in both standards is investigated and differences between the static and the dynamic analysis are examined, highlighting cases where significant discrepancies may occur. The analysis includes single or multiple generators connected to isolated or grid connected topologies.

Keywords: Short-circuit calculation, IEC 60909, ANSI, ATP/EMTP modeling.

Высоковольтный расчет токов короткого замыкания в соответствии со стандартами IEC-60909 [1] и ANSI [2] является одной из наиболее распространенных процедур для энергетика. Оба стандарта используют методологию статического расчета, основанную на методе эквивалентного источника напряжения. Эта методология может использоваться для расчета максимального и минимального токов SC как для симметричных, так и для асимметричных повреждений. Тем не менее, более точные результаты могут быть получены путем расчета токов SC из фактических сигналов, которые получены путем динамического моделирования условий повреждения. Программное обеспечение ATP / EMTP [3] является эталоном, учитывающим исследования переходных процессов в энергосистемах, и, безусловно, способно обрабатывать симуляции SC [4].

В этой статье проводится тщательное исследование различных сценариев SC в сетях с синхронными генераторами. Были использованы методы стандартов IEC-60909 и ANSI, а также динамическое моделирование ATP / EMTP, поскольку комбинированные вычисления и сравнение результатов позволяют лучше понять значимость всех предположений, используемых в расчетах SC и полезные выводы для практических инженерных приложений.

Более конкретно, влияние переходных характеристик генераторов на токи SC рассматривается для различных условий SC и топологий сети изолированных и подключенных к сети генераторов. Влияние места повреждения также исследуется, и анализ распространяется на несколько топологий с синхронными генераторами. Результаты оцениваются также с использованием соответствующих формул для расчета тока КЗ в синхронных генераторах.

Рассмотренная конфигурация представлена на рис. 1 и состоит из двух синхронных генераторов и двух повышающих трансформаторов, подключенных через воздушную линию электропередачи (ОНТЛ) к шине. ОНТЛ имеет переменную длину l , а его удаленный конец (N3) подключен либо к локальной нагрузке, соответствующей топологии изолированной сети (топология I), либо к жесткой шине, представляющей генераторы, работающие в топологии, подключенной к сети (топология). II). В обоих случаях предполагается, что генераторы выдают номинальную

мощность при номинальном коэффициенте мощности для устойчивого состояния, предшествующего отказу. Генераторы и контактная сторона повышающих трансформаторов заземлены напрямую.

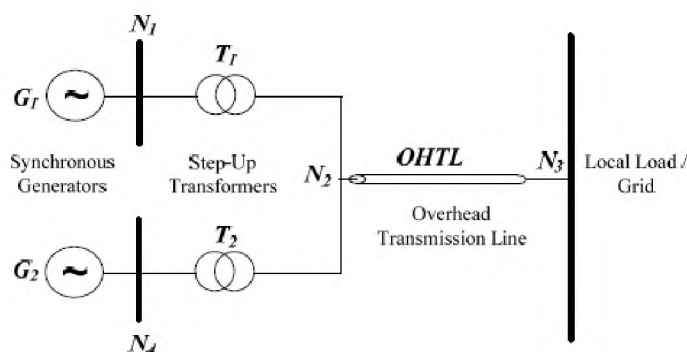


Рис. 1. Исследуемая система

Вышеупомянутые две топологии сети используются для представления двух разных схем сетки, характеризуемых как GS и GL. В схеме GS два небольших гидрогенератора питают распределительную шину среднего напряжения 20 кВ, в то время как в схеме GL два больших газотурбинных генератора соединены с шиной передачи 150 кВ. Соответствующие данные представлены в табл. 1.

Описание	Символ	Данные	
		GL G _s	
Synchronous Generator			
Номинальная видимая мощность (MVA)	$SG-r$	161.7	1.35
Напряжение (kV)	$Ve-r$	15	0.6
Фактор мощности	p^f	0.85	0.8
Синхронная прямая осевая реактивность (pu)	X_d	1.97	1.876
Переходная прямая осевая реактивность (О.е.)	$X'd$	0.22	0.211
Субтранзитивное прямое осевое реактивное сопротивление (pu)	$X''d$	0.165	0.099
SC-переходная постоянная времени (мс)	$T'd$	940	346
SC- постоянная времени постоянная (мс)	$T''d$	31	6
Step-Up Transformer			
Номинальная видимая мощность (MVA)	$sT-r$	180	1.6
Напряжение (kV)	$V_{ij}/VT2$	150/15	20/0.6
Напряжение Импеданса (pu)	Uk	0.152	0.061
Резистивный комп. Импедансное напряжение (pu)	u_r	0.002	0.0113
Группа Вектор	-	Yd5	Yd5
Overhead Transmission Line			
Импульс ОТЛ с положительной последовательностью (П / км)	$R'j+jX'j$	0.09+j0.42	0.3+j0.3
Импульс ОТЛ нулевой последовательности (П / км)	$R'o+jX'o$	0.23+j1.31	0.5+J1.7

Процесс расчета короткого замыкания в соответствии со стандартами IEC-60909 и ANSI основан на методе эквивалентного источника напряжения с некоторыми допущениями. Тщательный анализ двух статических подходов с учетом предаварийных условий, представления топологии сети и текущих расчетов SC был представлен в [4], [7] - [9]. С другой стороны, АТР / EMTP предлагает адекватное моделирование динамического поведения всей системы во время сбоя. Для динамического моделирования генераторы, трансформаторы и ОНТЛ моделируются с использованием синхронной машины типа 59, моделей BSTRAN и JMarti соответственно [3], в то время как нагрузка

представлена эквивалентной сосредоточенной цепью R-L.

Хотя в анализе SC точное моделирование элементов сети в частотной области не является необходимым, в анализе для ОНТЛ была выбрана модель ATP / EMTP JMart. Это было сделано для того, чтобы избежать возможных конфликтов из-за сочетания емкостных эквивалентных емкостей PI-модели и импеданса с сосредоточенной нагрузкой. Однако как в МЭК 60909, так и в стандартах ANSI используются упрощенные модели линий передачи, игнорируя шунтирующие емкости. Поэтому, чтобы избежать ошибок из-за различных моделей линий, было проведено другое моделирование с использованием эквивалента R-L для линии передачи. Текущие результаты SC сравниваются с соответствующей моделью линии JMart, показывающей очень хорошее согласие.

Кроме того, при динамическом моделировании важно выбрать правильные условия напряжения в месте повреждения, чтобы рассчитать максимальный ток SC. Максимальные пиковые и среднеквадратичные токи во время SC могут происходить в разное время [10], поэтому рассматриваются два времени инициализации SC. Во-первых, один максимальный пиковый ток (i_{p-max}), соответствующий максимальному смещению постоянного тока, когда напряжение равно нулю, тогда как в этом случае начальный симметричный ток обозначается как $I''k @ i_{p-max}$. Во второй раз вычисляется максимальный начальный симметричный ток ($I''k-max$), а соответствующий пиковый ток равен $i_{p @ I''k-max}$. Это проиллюстрировано на рис. 2а, где трехфазный ток SC в N1 представлен для разных времен инициализации повреждения (t_{sc}) и для генератора GS в сети Topology II, предполагая, что работает только один генератор, а длина линии равна 2 км. При t_{sc} , равном 16 мс, происходит i_{p-max} , а при t_{sc} , равном 18 мс, $I''k-max$ записывается.

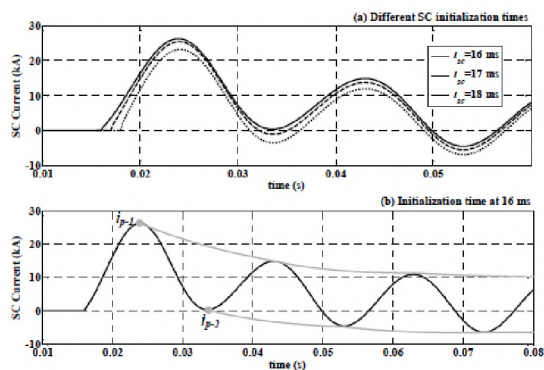


Рис. 2. Фаза токового отклика во время трехфазного SC на шине N1 для схемы взаимосвязанного малого генератора (а) различные времена инициализации SC (б) огибающие тока для времени инициализации в 16 мс

Влияние генераторов субтрансиентной эффективности

Как стандарты МЭК-60909, так и стандарты ANSI не учитывают постоянные времена $T'd$ и $T'd$ в расчетах SC, которые определяют переходное и нестационарное поведение синхронных генераторов в условиях неисправности. В (A1) и (A3) Приложения представлены соответствующие формулы тока SC для случаев трех- и однофазных замыканий на землю, соответственно, где влияние $T'd$ и $T'd$ показано аналитически.

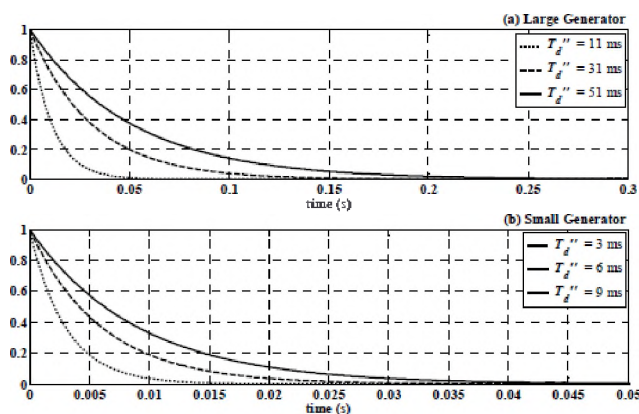


Рис. 3. Значения выражения $\exp(-t / Td'')$ в зависимости от времени для (а) Большого и (б) Малого генераторов

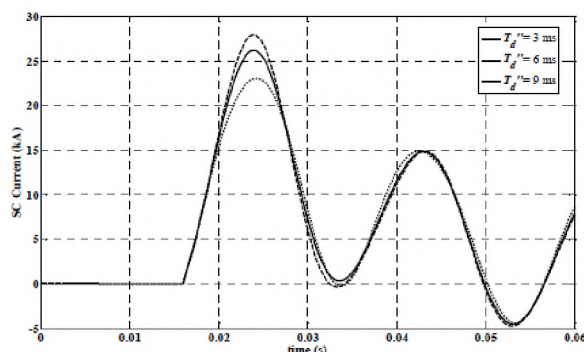


Рис.4. Фазовые отклики тока во время трехфазного SC на шине N1 для схемы взаимосвязанного малого генератора и различных значений $T''d$. SC на 16 мс

Влияние $T''d$ на токи SC исследуется, исследуя трех- и однофазные замыкания на землю на шине N1, используя программное обеспечение ATP / EMTP, и результаты сравниваются с соответствующими, полученными стандартами IEC-60909 и ANSI. Рассматриваются как сетевые схемы GS и GL, так и две топологии сети для автономной сети (топология I) и для сети, подключенной к сети (топология II), при условии, что в работе только генератор G1, а длина линии равна 2 км.

Абсолютные различия между двумя статическими подходами и динамическим моделированием постепенно уменьшаются по мере увеличения расстояния до места повреждения от генератора как для трехфазных, так и для однофазных неисправностей. Это связано с тем, что эквивалентная субтранзитивная постоянная времени $T''de$ является возрастающей функцией с расстоянием до повреждения, как показано на рис. 5, где (A2b) нанесено на график с различными значениями внешнего импеданса X_e , что приводит к более длительному субпереходу. Сроки исполнения. Длина линии предполагается переменной с длиной 2 и 10 км.

Для трехфазного замыкания на землю результаты тока SC по моделированию ATP / EMTP во всех случаях ниже, чем соответствующие минимальные токи SC IEC, в то время как для однофазного замыкания на землю результаты динамического моделирования находятся между минимальными и максимальными значениями GK и IP-токов в соответствии с IEC. Различия между двумя статическими подходами и динамическим моделированием являются более серьезными для трехфазного замыкания на землю, чем для однофазного замыкания на землю.

Заключение

В этой работе были исследованы различные симметричные трех- и несимметричные сценарии однофазного заземления, включающие синхронные генераторы, работающие либо в изолированной сети, либо в топологии, связанной с сеткой. Результаты, полученные с помощью широко используемых стандартов ANSI и IEC 60909 и динамического моделирования с использованием программного обеспечения ATP / EMTP, сравниваются для оценки влияния различных параметров.

Для случая генератора, подключенного к сети, токи короткого замыкания, рассчитанные с помощью двух статических подходов стандартов, ближе к тем, которые получены при динамическом моделировании, по сравнению с соответствующими результатами для топологии изолированной сети. Поэтому в изолированных сетях, как и в автономном режиме работы, могут существовать значительные ошибки при расчете токов SC, рассчитанных в соответствии с IEC-60909 и ANSI / IEEE, в случаях, когда присутствуют генераторы.

Показано, что влияние постоянной времени перехода генератора на величину тока повреждения является значительным. Этот параметр сильно влияет на начальный отклик тока повреждения. Как в стандарте IEC 60909, так и в стандартах ANSI им пренебрегают, что приводит к значительным различиям в расчетах тока SC, особенно для случаев, когда синхронные генераторы характеризуются очень короткими переходными постоянными времени. Аналогичным образом, влияние места повреждения рассматривается. Показано, что по мере увеличения электрического расстояния между точкой повреждения и генератором различия между двумя статическими подходами и динамическим моделированием постепенно уменьшаются, поскольку эквивалентная субпереходная постоянная времени сети увеличивается, что приводит к меньшим субтранзитивным

периодам.

Расследование распространяется на многократные неисправности, изучая одновременную работу двух синхронных генераторов. Завышенные и недооцененные токи с помощью двух статических подходов регистрируются в зависимости от различных параметров, и поэтому общий вывод не может быть получен, и необходим дальнейший систематический анализ.

Процедуры расчета, описанные в стандартах МЭК 60909 и ANSI, обычно принимаются как эффективные методы, что приводит к результатам, которые в большинстве случаев полагаются на безопасную сторону. Однако существуют определенные случаи, особенно при наличии нескольких генераторов, когда пользователь должен быть достаточно осторожным, чтобы избежать переоценки или, что еще хуже, недооценки защитного оборудования. Этот документ дает лучшее представление о расчете токов повреждения с помощью IEC, ANSI и динамического моделирования, выделяя случаи, когда могут возникнуть такие расхождения.

Список литературы

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Учебник для электроэнергетических спец. вузов. / В.А. Веников - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа. 1970. - 472 с., с ил.
2. Веников В.А. Жуков Л.А., Поспелов Г.Е. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей. Под ред. Веникова В.А. - Высшая школа, 1975, - 344 с.
3. Строев В.А., В.А. Строев, С.И. Николаев Об учете автоматических регуляторов в расчетах переходных процессов электроэнергетических систем. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. -№3.
4. Лоханин Е.К. Упрощение уравнений синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости сложных энергосистем. Электричество. – 1999. – №11.
5. Джунуев Т.Т. Расчеты асинхронных режимов турбогенераторов при потере возбуждения. Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Известия», КГТУ, №3(36), 2015.
6. Мамакеева А.К. Расчет и анализ качаний генераторов ЭЭС при отсутствии аварийного резерва мощности. VIII Международная научно-техническая конференция ЭНЕРГЕТИКА, Сборник трудов, АмГУ, - Благовещенск, 2015. С. 183-186.
7. Джунуев Т.Т., Мамакеева А.К. Полная модель синхронной машины в асинхронном режиме при потере возбуждения. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 68. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай – ИСЭМ СО РАН, 2017 г. – 682 с.
8. Джунуев Т.А., Джунуев Т.Т., Мамакеева А.К. Применение метода малых колебаний для анализа устойчивости ЭЭС ограниченной мощности Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Известия» №32 (часть I), КГТУ, - Бишкек, 2014. С. 294-296
9. Джунуев Т.А. Анализ аварийных режимов работы энергосистемы в условиях отсутствия аварийного режима. Энергетика: Управление, качество и эффективность использования Энергоресурсов Благовещенск, 2015
10. Джунуев Т.Т., Абдылдаева М.Т. Расчеты асинхронных режимов турбогенераторов при потере возбуждения. Теоретический и прикладной научно-технический журнал Известия КГТУ, №3(36), - Бишкек, 2015. - С.179-183.