Исследование электромагнитных переходных процессов в цепях генераторного напряжения малых ГЭС

12, декабрь 2012

DOI: 10.7463/1212.0506066

Гусев Ю. П., Омокеева А. А.

УДК 621.313/316.019.3.001.2

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

GusevYP@mpei.ru

Математическая модель сети генераторного напряжения станции. При оснащении сети генераторного напряжения выключателями с жестким дугогашением на изоляции коммутируемого электрооборудования могут возникнуть высокие кратности перенапряжений. Перенапряжения, возникающие при коммутациях генераторными выключателями, вызывают ускоренную деградацию изоляции оборудования, что может привести к возникновению аварий в цепях генераторного напряжения малых ГЭС.

Исследования коммутационных процессов проводились с помощью разработанных в программе *EMTP-RV* (Electromagnetic transients program) математической модели блока станции с генераторными маломасляными, элегазовыми и вакуумными выключателями и смежного участка сети. Расчетная схема блока с указанием расчетных точек короткого замыкания (КЗ) показана на рис. 1. В блоке генераторы типа ВГС (мощностью 5,63 МВА) и повышающий трансформатор типа ТД (мощностью 10 МВА) соединяются с ячейкой выключателя с помощью соединительных токопроводов.

Рис. 1. Расчетная схема блока станции

Основной характеристикой исследуемых процессов является переходное восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя, которое зависит от основных параметров цепи, таких как индуктивности и емкости. Параметры основного электрооборудования математической модели блока в *EMTP-RV* соответствуют параметрам электрооборудования действующих ГЭС Аламединского каскада (КАГЭС) Кыргызстана, полученных путем анализа их электрических схем [1].

Емкости и индуктивности генераторов ($C_G=0,1-3,0$ мкФ, $L_G=0,3-0,8$ мГн) и трансформаторов ($C_T=1-20$ нФ, $L_T=0,13-0,4$ мГн) существенно различаются и изменяются в широких пределах [2, 3]. Параметры энергосистемы и остального оборудования (трансформаторов собственных нужд, измерительных трансформаторов, соединительных токопроводов, шинопроводов и другой нагрузки на шинах генераторного напряжения и на шинах со стороны высокого напряжения) варьировались и рассчитывались согласно общепринятым правилам [2, 3].

Анализ влияния параметров электрооборудования блока на коммутационные переходные процессы. Компьютерные исследования позволили оценить влияние мощности генераторов, трансформатора, длины и сечения соединительных токопроводов на среднюю скорость роста и максимальное значение переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя, и уровни возникающих перенапряжений K_n на электрооборудовании блока при коммутациях генераторным выключателем.

Произведенные компьютерные расчеты для исследуемого объекта показали, что с увеличением мощности генераторов блока кратность перенапряжений на их статорной обмотке уменьшаются рис. 2. Повышение мощности, как правило, означает увеличение размеров паза и сечения проводников, что ведет к увеличению емкости и индуктивности. Полученные экспериментальным путем зависимости высокочастотной индуктивности L (индуктивность на частотах несколько ниже основной собственной частоты) генераторов от частоты показывают, что значения индуктивностей имеют постоянное значение в широком диапазоне частот и не очень сильно изменяются в области частот представляющих интерес при расчете восстанавливающегося напряжения [3]. L связана в основном со сверхпереходным реактансом, который создается главным образом потоком рассеяния статора, так как высокочастотный поток заключен почти целиком в статоре.

Построенная зависимость сверхпереходного продольного сопротивления генераторов, значения которого были приняты из справочных каталогов при проведении расчетов, от мощности генераторов показывает, что эта зависимость приблизительно линейна (см. рис. 3). С учетом того, что высокочастотная индуктивность L изменяется в соответствии со сверхпереходной индуктивностью L_d'' , то, следовательно, L принимает

большие значения при больших мощностях генераторов. В таком случае можно предположить, что значения сверхпереходной индуктивности при больших мощностях генераторов определяют низкую частоту собственных колебаний и скорость роста восстанавливающегося напряжения, что становится причиной снижения максимальной амплитуды напряжения на обмотке (не учитывая емкостного влияния), и соответственно низкой кратности перенапряжения на статоре генератора.

Рис. 2. Зависимости кратности перенапряжений от мощности генераторов блока и мощности трансформатора: 1 – при $S_T=16$ MVA; 2 - при $S_T=10$ MVA

Исследования показали, что различие значений основных параметров генераторов и трансформаторов обусловлена существенной разницей между обмотками трансформаторов и генераторов (в трансформаторах большее число витков, сильная взаимоиндукция, между фазами генератора малая продольная емкостная связь). Найденная в [3] для генераторов тенденция сохранять относительно постоянное значение высокочастотной индуктивности отсутствует у трансформаторов, однако при этом скорость изменения высокочастотной индуктивности невелика. Следовательно, для трансформаторов большей мощности с крупными сечениями проводов следует ожидать более сильного уменьшения индуктивности, что объясняется наличием вихревых токов в немагнитных материалах (в меди обмоток).

Рис. 3. Зависимость сверхпереходного продольного сопротивления x_d'' от мощности S_G генератора

Зависимость индуктивности трансформатора, вычисленной по номинальным данным из справочных материалов, от мощности трансформатора показывает, что индуктивность имеет тенденцию к уменьшению с увеличением мощности.

С другой стороны также значительно влияние емкости на процессы восстановления напряжения на контактах выключателя, определяющие кратности перенапряжений на коммутируемом оборудовании. Кратности перенапряжений относительно земли на оборудовании, расположенном с той или другой стороны выключателя определяются напряжениями на изолированных нейтралях в установившемся режиме. Напряжения на условных нейтралях генератора и трансформатора определяются значениями входных емкостей. Так как емкость генератора существенно больше емкости трансформатора, то следовательно, напряжение на условной нейтрали трансформатора будет больше, чем на нейтрали генератора. Таким образом, существенно более высокий уровень перенапряжений на трансформаторе связан с существенно меньшим значением его входной емкости по сравнению с входной емкостью генератора, что непосредственно влияет на уровень перенапряжений как на самом выключателе, так и на коммутируемом генераторе блока.

Математические модели генераторных выключателей. Модели разработанных выключателей учитывают особенности процессов дугогашения в разных средах. Модели маломасляных и элегазовых выключателей выполнены на основе уравнений Касси (1) и Майера (2), согласно которым на каждом шаге решения в качестве выходной переменной получена проводимость дугового промежутка [4].

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{i \cdot u}{U_c^2} - g_c \right), \quad (1)$$

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i^2}{P_0} - g_m \right), \quad (2)$$

где g_c, g_m, τ_c, τ_m - проводимости дуги и постоянные времени модели Касси и Майера соответственно, P_0 - отводимая тепловая мощность, U_c - «напряжение Касси», i, u - ток и напряжение на дуге соответственно.

Диапазон изменения параметров уравнений для элегазовых выключателей были определены путем анализа научных работ по моделированию элегазовых выключателей: $\tau_c = 0,25 \div 2,5$ мкс, $\tau_m = 0,22 \div 3,0$ мкс, $U_c = 0,5 \div 5,414$ кВ и $P_0 = 8,8 \div 1500$ кВт. Для определения параметров дуги в маломасляных выключателях использовались экспериментальные осциллограммы изменения токов и напряжений дуги работы [5], в которой проводились исследования процессов отключения токов короткого замыкания (8 и 10 кА) маломасляным выключателем типа ВМП-10. Параметры дуги в масле вычислялись по методике, приведенной в работе [6]. В результате проведенных вычислений получены следующие значения параметров уравнений $\tau_c = 0,018 \div 0,8$ мкс, $\tau_m = 0,05 \div 1,1$ мкс, $U_c = 70 \div 11811$ В и $P_0 = 791,7 \div 4142,17$ кВт.

Модель вакуумного выключателя в программе *EMTP-RV* позволяет осуществить сравнение восстанавливающегося напряжения $u_B(t)$ на контактах выключателя с диэлектрической прочностью $u_{ДЭ}(t)$, которая описывается выражением [2]

$$u_{ДЭ}(t) = k(t + t_0), \quad (3)$$

где k - скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка после погасания дуги, t_0 - время сдвига между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока промышленной частоты через нулевое значение.

На рис. 4. показан процесс «соревнования» возрастающего восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя u_B с диэлектрической прочностью промежутка $u_{ДЭ}$ при отключении вакуумным выключателем генератора. При превышении восстанавливающегося напряжения диэлектрической прочности, выключатель под действием блока управления моделирует повторные зажигания дуги, при котором через контакты выключателя протекает высокочастотный ток. Вакуумные выключатели способны гасить высокочастотные токи со скоростью перехода через нуль до 50–100 А/мкс [2]. Повторные зажигания в межконтактном промежутке могут стать причиной перенапряжений на изоляции коммутируемого оборудования высоких кратностей.

Рис. 4. Процесс соревнования восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя и электрической прочности промежутка

Одной из причин создаваемых перенапряжений вакуумными выключателями является *срез тока* $i_{\text{ср}}$, значение которого зависит от параметров материала контактов. В результате проведенных расчетов получена зависимость кратности перенапряжений, возникающих на статоре коммутируемого генератора блока от величины среза тока при отключении вакуумным выключателем номинального тока (см. рис. 5).

Рис. 5. Зависимость кратности перенапряжений K_n на статоре генератора блока при отключении вакуумным выключателем от значения среза тока

Из полученной зависимости следует, что предпочтительным является применение для коммутаций в цепях генераторов малых ГЭС вакуумных выключателей с током среза менее 5 А и низкой вероятностью повторных пробоев, что позволит уменьшить негативное влияние градиентных перенапряжений на изоляцию генератора.

Влияния типа выключателя на коммутационные переходные процессы. Как известно, среда отключения в выключателях должна обладать высокими теплопроводностью и электроизоляционными свойствами. Проведенные расчеты показали, что кратности перенапряжений на статоре генератора могут изменяться в зависимости от типа генераторного выключателя при постоянных параметрах исследуемого объекта.

Диаграмма наибольших кратностей перенапряжений на генераторе, при коммутациях различными типами выключателей номинального тока, токов КЗ и холостого хода трансформатора показана на рис. 6. Из диаграммы видно, что коммутация номинальных токов и токов КЗ маломасляными, элегазовыми и вакуумными выключателями не приводит к перенапряжениям на статорной обмотке генератора. Полагая, что электрическая прочность статорной изоляции генератора находится на уровне 2,6-2,9 о.е. [2], из полученных компьютерных осциллограмм следует, что при отключении вакуумными выключателями токов холостого хода повышающего трансформатора блока изоляция генератора подвергается наибольшим кратностям перенапряжений.

Рис. 6. Максимальные значения кратности перенапряжений при отключении различными выключателями: 1 – номинального тока; 2 – тока КЗ; 3 – тока холостого хода

Исследования переходных процессов при вышеуказанном диапазоне изменения параметров элементов сети позволили получить компьютерные осциллограммы, по которым были определены скорости роста восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя. Согласно которым наибольшие начальные скорости восстановления напряжения на контактах выключателя возникают при отключении токов КЗ на выводах генератора в точке K_3 (см. рис. 1). В этом случае отключаемый ток является

суммой токов от второго генератора блока и от энергосистемы. Наибольшие значения скорости восстанавливающегося напряжения (80–100 кВ/мс) определяют требуемую диэлектрическую прочность вакуумной дугогасительной камеры (ВДК), при которой не должны возникать повторные зажигания и соответственно эскалация напряжения, что может быть определяющим критерием при выборе выключателя. Также из полученных осциллограмм следует, что существенно меньшая опасность переходного процесса имеет место при отключении номинального тока генератора (55 – 65 кВ/мс).

Влияние параметров (длины и сечения) соединительных токопроводов показали, что наибольшие кратности перенапряжений соответствуют присоединениям с меньшими длинами соединительных токопроводов (более $2,5U_{фн}$ при длинах меньше 75 м). При отключениях вакуумными выключателями тока холостого хода трансформатора кратность перенапряжений на статоре генератора может превышать допустимые значения и достигать 3,76 о.е., что обуславливает необходимость дополнительных мер для ограничения перенапряжений (см. рис. 7).

Рис. 7. Кратности перенапряжений в зависимости от параметров соединительных токопроводов между генератором и выключателем (а) и между выключателем и трансформатором (б) при отключениях вакуумным выключателем тока холостого хода трансформатора T

Таким образом, проведенные исследования показали, что уровни перенапряжений при коммутациях выключателями существенно зависят от основных характеристик сети генераторного напряжения, таких как длина и сечение соединительных токопроводов, мощности и типа генератора блока. Опасность представляют перенапряжения, при коммутациях вакуумными выключателями, сопровождающиеся при недостаточной прочности межконтактного промежутка многократными ПЗ дуги. Снижение перенапряжений, возникающих на присоединениях генераторов блока можно осуществить с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и RC-цепочек [7].

Оценка эффективности мероприятий по защите изоляции основного оборудования ГЭС малой мощности от перенапряжений. Компьютерные осциллограммы восстанавливающегося напряжения на контактах вакуумного выключателя при установке ОПН показали, что ОПН позволяет ограничить амплитуду перенапряжений и уменьшить количество ПЗ дуги. Однако, поскольку ОПН срабатывает при определенном повышении напряжения, то он практически не влияет на начальный процесс восстановления напряжения и его частоту.

Расчеты показали, что при малых значениях скорости роста диэлектрической прочности вакуумного межконтактного промежутка (менее 50 кВ/мс) кратность перенапряжений на выводах генератора, при отключении номинального тока, превышает $2,9U_{\text{фн}}$ при длине соединительного токопровода менее 75 м. Значения уровней перенапряжений на выводах отключаемого генератора при варьировании параметрами защитной RC – цепочки приведены на рис. 8.

Рис. 8. Зависимости кратностей перенапряжений на выводах генератора от параметров защитной RC –цепочки

Из полученной зависимости, приведенной на рис. 8 следует, что наибольшее снижение перенапряжений достигается при значениях емкости $C=0,1-0,3$ мкФ и сопротивления $R=50 - 100$ Ом защитной цепочки.

Рис. 9. Зависимости количества повторных зажигания $N_{ПЗ}$ в вакуумном промежутке от параметров защитной RC –цепочки

Защитное действие RC - цепочки проявляется в уменьшении частоты собственных колебаний процесса восстановления напряжения на контактах выключателя, что приводит либо к снижению количества ПЗ (см.рис. 9), либо к их полному исключению. Из рис. 9 видно, что на количество ПЗ дуги влияет значение емкости защитной цепочки (с увеличением емкости количество ПЗ уменьшается). Компьютерные осциллограммы показали, что на характеристики процесса отключения хотя и незначительно, но влияет и место установки RC - цепочки (см. табл. 1).

Таблица 1

Влияние места установки RC – цепочки на процесс восстановления напряжения
($R=100 \text{ Ом}$, $C=0,1 \text{ мкФ}$)

Место установки RC - цепочки	$N_{ПЗ}$	K_r , о.е.	K_v , о.е.
Перед выключателем (со стороны генератора)	6	2,85	2,35
За выключателем (со стороны повышающего трансформатора)	8	2,93	2,49

По приведенным данным в таблице 1 следует, что количество ПЗ и уровень перенапряжений на выводах генератора несколько уменьшаются при установке RC – цепочки перед выключателем со стороны генератора.

В таблице 2 приведены результаты расчетов переходных процессов, сопровождающих отключение генераторов вакуумным выключателем, где показаны

зависимости значений кратностей перенапряжений на выводах генератора и на контактах выключателя при варьировании номинальной мощности генератора и неизменной длине соединительного токопровода.

Таблица 2

Характеристики процесса, эффективность RC – цепочки при различной мощности генераторов

№ п/п	$P_{\text{ном}},$ МВт	$N_{\text{пз}}$	$K_{\text{г}}, \text{о.е.}$	$K_{\text{в}}, \text{о.е.}$	Наличие (+) и отсутствие (-) RC - цепочки
1.	4,5	8	3	2,53	-
		6	2,8	2,35	+
2.	6,4	4	2,66	2,08	-
		2	2,5	2,05	+
3.	7	3	2,4	1,9	-
		0	2,3	1,7	+

Компьютерные расчеты в *EMTP-RV* показали, что присоединение RC - цепочек совместно с ОПН позволило исключить ПЗ в выключателе, снизить крутизну подъема напряжения и повысить затухание высокочастотного переходного процесса. Следовательно, более глубокое ограничение перенапряжений осуществляется при совместной установке на присоединении ОПН и RC – цепочки. В то время как защитное действие ОПН начинает проявляться лишь при достаточном для его «срабатывания» уровня напряжения, RC – цепочка оказывается подключенной с самого начала переходного процесса.

Выводы:

1. Компьютерное исследование коммутационных перенапряжений, вызванных работой генераторными выключателями особо важно с точки зрения оценки электрической прочности изоляции обмоток генератора, как наименее прочной в блочной схеме станции. При этом становится возможным определение влияния на электромагнитные переходные процессы при коммутациях выключателями параметров сети и процессов, протекающих в дугогасительной камере выключателя.

2. Перенапряжения достигают опасных для изоляции генератора значений при коммутациях вакуумным выключателем тока холостого хода трансформатора (порядка 100 А). При применении вакуумных выключателей в цепи «генератор – трансформатор» должен решаться вопрос о необходимости средств защиты от коммутационных

перенапряжений (ОПН, RC - цепочки), путем сопоставления импульсной прочности изоляции электрооборудования и характеристик воздействующих перенапряжений. Наибольшее снижение кратностей перенапряжений достигается при следующих параметрах защитной RC - цепочки: $C=0,1-0,3$ мкФ и $R=50 - 100$ Ом.

3. Моделирование процессов при принятых параметрах элементов сети (оборудования малых ГЭС) показало, что требуемая начальная скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного промежутка ВДК должна быть не менее 80 – 100 кВ/мс (при длине соединительных токопроводов менее 75 м). Предпочтительным является установка в цепях генераторного напряжения вакуумных выключателей с током среза менее 5 А.

Список литературы

1. Тулебердиев Ж.Т., Рахимов К.Р., Беляков Ю.П. Развитие энергетики Кыргызстана. Бишкек: Шам, 1997. 266 с.
2. Демянчук В.М., Кадомская К.П., Тихонов А.А., Щавелев С.А. Методика оценки перенапряжений, возникающих при отключении двигателей вакуумными выключателями // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 1994. № 5-6. С. 27-33.
3. Хаммарлунд П. Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя / Под ред. Г.В. Буткевича. Л.: Госэнергоиздат, 1956. 296 с.
4. Bizjak G., Zunko P., Povh D. Circuit Breaker Model For Digital Simulation Based On Mayr's And Cassie's Differential Arc Equations // IEEE Transactions on Power Delivery. July 1995. Vol. 10, no. 3. P. 1310-1315. DOI: 10.1109/61.400910
5. Шилин Н.В. Научно-технические основы повышения отключающей способности масляных выключателей: дис. ... докт. техн. наук / Научно-исследовательский центр по испытанию высоковольтной аппаратуры. М., 1984.
6. Gimenez W., Hevia O. Method to determine the parameters of the electric arc from test data // IPST'99 – International conference on Power system transients (Hungary, Budapest, 20-24 June, 1999), 1999. P. 505-509.
7. Бушуев С.А., Волков А.Ю., Ларин В.С., Лоханин А.К., Матвеев Д.А., Пугаченко З.Е., Семененко Н.Ю., Шейко П.А. Исследование коммутационных перенапряжений, генерируемых вакуумными генераторными выключателями на энергообъекте // V Международная конференция «Высоковольтное коммутационное оборудование» (Москва, Ноябрь 2009 г.).

Study of electromagnetic transients in circuits of small hydroelectric generator voltage

12, December 2012

DOI: 10.7463/1212.0506066

Gusev Yu.P., Omokeeva A.A.

Russia, National Research University «MEI»

GusevYP@mpei.ru

Currently, operation experience of vacuum and gas-insulated circuit breakers substituting oil ones in the chain "generator - transformer" is not enough. Therefore, in each case, installation of switches of a new generation requires an analysis of the switching processes. For conducting a research, mathematical models of the block scheme for low power hydro-plants and switches of various types among EMTP-RV were created. The authors estimated the levels of overvoltage occurring in switching by power-producing switches for various combinations of parameters of the main equipment unit; they analyzed the influence of parameters and places of installation of overvoltage protection. The main provisions of the research can be used by design organizations for reconstruction of low-power hydro-plants; in preparation of instructions for use of overvoltage protection when overvoltage is caused by commutation of vacuum switches in circuits of power-producing stations.

Publications with keywords: overvoltage, networks of generator voltage, low power hydroelectric stations, vacuum and SF6 circuit breakers, equations of Cassie and Mayer, EMTP-RV

Publications with words: overvoltage, networks of generator voltage, low power hydroelectric stations, vacuum and SF6 circuit breakers, equations of Cassie and Mayer, EMTP-RV

References

1. Tuleberdiev Zh.T., Rakhimov K.R., Beliakov Iu.P. *Razvitie energetiki Kyrgyzstana* [The development of energy sector of Kyrgyzstan]. Bishkek, Sham, 1997. 266 p.
2. Demianchuk V.M., Kadomskaia K.P., Tikhonov A.A., Shchhavelev S.A. Metodika otsenki perenapriazhenii, voznikaiushchikh pri otkliuchenii dvigatelei vakuumnymi vykliuchateliami [Methodology of evaluation of the overvoltage that arise when the engine shut off by vacuum circuit breakers]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG. Energetika* [News of higher educational institutions and energy associations of the CIS energy. energetics], 1994, no. 5-6, pp. 27-33.
3. Khammarlund P. *Vosstanavlivaiushcheesia napriazhenie na kontaktakh vykliuchatelii* [Recovery voltage at the contacts of the switch]. Leningrad, Gosenergoizdat, 1956. 296 p.

4. Bizjak G., Zunko P., Povh D. Circuit Breaker Model For Digital Simulation Based On Mayr's And Cassie's Differential Arc Equations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 1995, vol. 10, no. 3, pp. 1310-1315. DOI: 10.1109/61.400910

5. Shilin N.V. *Nauchno-tekhnicheskie osnovy povysheniia otkliuchaiushchei sposobnosti maslianykh vyklyuchatelei*. *Dokt. diss.* [Scientific-technical basis for improving the breaking capacity of oil switches. Dr. diss.]. Nauchno-issledovatel'skii tsentr po ispytaniyu vysokovol'noi apparatury [Scientific research center for high-voltage equipment testing], Moscow, 1984.

6. Gimenez W., Hevia O. Method to determine the parameters of the electric arc from test data. *Proc. of the IPST'99 – International conference on Power system transients*, Hungary, Budapest, 20-24 June, 1999, pp. 505-509.

7. Bushuev S.A., Volkov A.Iu., Larin V.S., Lokhanin A.K., Matveev D.A., Pugachenko Z.E., Semenenko N.Iu., Sheiko P.A.. Issledovanie kommutatsionnykh perenapriazhenii, generiruemyykh vakuumnymi generatornymi vyklyuchateliami na energoob"ekte [The study switching overvoltage generated by the vacuum generator circuit breakers on the energy facility]. *5 Mezhdunarodnaia konferentsiia «Vysokovol'noe kommutatsionnoe oborudovanie»* [The 5th International Conference "High-voltage switching equipment"], Moscow, November, 2009.