Практический анализ перенапряжений вследствие прямого разряда молнии на подстанции 400 кВ

Одной из самых серьёзных причин возникновения перенапряжений в энергосистемах является молния. Ежегодно во всем мире наблюдается несколько миллионов молний.

А. Аннамалай (A. Annamalai), Аруна Гулати (Aruna Gulati), Рамеш Коул (Ramesh Koul), компания Bharat Heavy Electricals Limited, Нью Дели, Индия

Такие перенапряжения могут вызвать возникновение электрической дуги и нанести вред оборудованию подстанций. Следовательно, подход к выбору электрической прочности оборудования во избежание повреждения его изоляции должен быть предельно тщательным. В целях предотвращения пробоя изоляции оборудования рекомендуется использовать такие защитные устройства, как разрядники. Следовательно, для контроля грозовых перенапряжений очень важно определить местоположение, количество и размер разрядников на подстанции. Для исследования явления грозовых перенапряжений использовалось программное обеспечение PSCAD™. В качестве примера воздействия грозовых перенапряжений и выбора номинальных характеристик разрядников была использована типичная подстанция 400 кВ. Результаты моделирования подтвердили, что предложенное местоположение и количество разрядников соответствуют требованиям уровня изоляции оборудования.

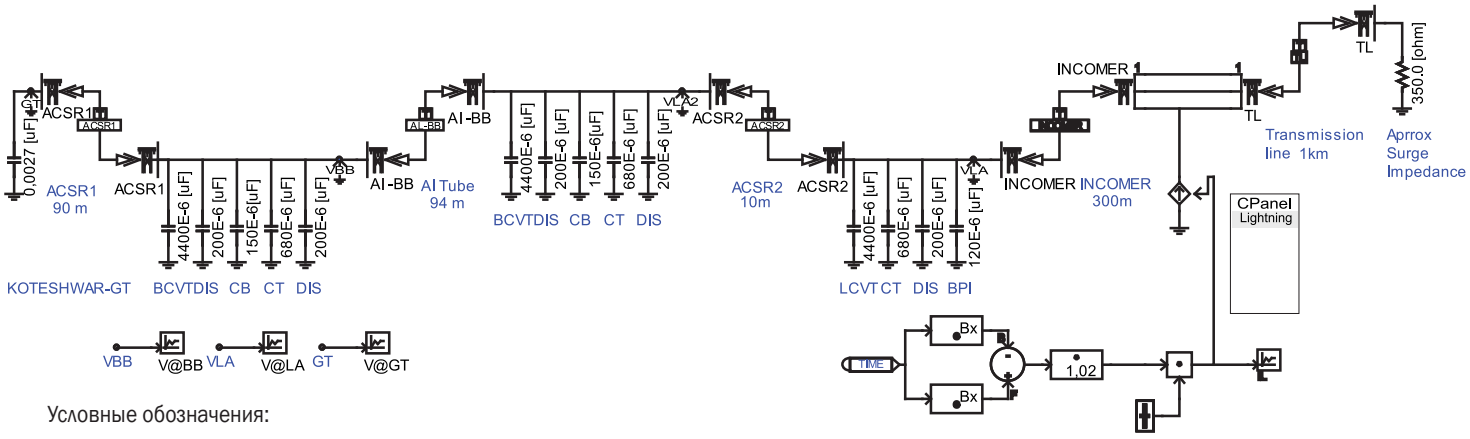
АНАЛИЗ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Грозовое перенапряжение вследствие разряда молнии генерирует волны, которые могут проникнуть в подстанцию при прямом ударе молнии или по входящим линиям передачи в качестве блуждающих волн. Несколько первых опор от подстанции снабжены соответствующими устройствами защиты от прямых ударов молнии, поэтому в подстанцию могут проникнуть только блуждающие волны. В этом исследовании грозовой разряд был направлен на опору, отстоящую от подстанции на 300 м. Основной уровень прочности изоляции системы составляет 1425 $кВ_{пик}$. для системы 400 кВ. Любое грозовое перенапряжение системы (будь то прямой удар молнии в фазу или перекрытие обратным напряжением после удара в грозотрос), которое вызывает перенапряжение больше этой величины, приводит к возникновению дугового перекрытия, значительно снижая уровень перенапряжения в самой точке вспышки. Значение тока прямого удара молнии рассчитывается при помощи модели Браун-Уайтхеда с учётом геометрии опоры и максимального разряда, проходящего через грозовую защиту. Расчётное значение прямого удара молнии составило 16 кА. Однако с учётом наихудшего сценария развития событий при моделировании значение тока прямого удара молнии принималось равным 20 кА (8/20μс).

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

При моделировании компоновка системы была следующей: ток молнии подаётся на опору, отстоящую от подстанции на расстоянии 300 м, и, перемещаясь по распредустройствам, достигает блока генератор—трансформатор. Всё подстанционное оборудование представлено в значениях конструктивных ёмкостей. Для линий передачи, алюминиевых шин и фазных проводов применялась частотно-зависимая модель фаз. Как известно, удар молнии может попасть за один раз только в одну из трёх фаз. Следовательно, ток грозового разряда подавался только на одну фазу (фаза Y). Рассматриваемая схема моделирования подстанции для исследования грозовых перенапряжений без разрядников представлена на рис. 1.

Рис. 1. Модель подстанции для исследования грозовых перенапряжений



Условные обозначения:

ACSR	сталеалюминиевый провод
GT	блок генератор—трансформатор
BCVT	ёмкостный ТН
DIS	короткозамыкатель
CB	автоматический выключатель
CT	трансформатор тока
Al Tube	алюминиевая труба
LCVT	ёмкостный ТН
LA	грозоразрядник
Transmission line	линия передачи
Approx Surge Impedance	прибл. волновое сопротивление
INCOMER	входящая линия
BB	шины
V@BB	напряжение на шинах
V@LA	напряжение грозоразрядника
V@GT	напряжение блока генератор—трансформатор

КРИТЕРИИ АНАЛИЗА

Импульсное выдерживаемое напряжение оборудования подстанции (включая трансформаторы) при ударах молнии составляет 1425 кВ$_{пик}$. Уровень защиты разрядника берётся 975 кВ$_{пик}$. при 20 кА. Следовательно, запас прочности защиты при токе 20 кА составляет (1425 — 975)/975 = 46,15%. Однако этот запас действителен только на выводах разрядника. Перенапряжение на выводах оборудования повышается по мере удаления оборудования от разрядника. Что касается трансформаторов, то разрядники устанавливаются в непосредственной близости к ним, обеспечивая хорошую защиту. Что касается распределительного оборудования, которое может быть расположено на значительном удалении от разрядника, уровень защиты может повышаться, при этом понижая запас прочности. Минимальный запас прочности в 5% для наружной изоляции обусловлен стандартом МЭК 71-2. Для выводов распредустройств, расположенных на высоте над уровнем моря 630 м, применяется поправочный коэффициент на атмосферные условия, равный 1,080, а для выводов блока генератор—трансформатор — поправочный коэффициент на атмосферные условия на высоте над уровнем моря 570 м, равен 1,072. В нашем случае при высоте над уровнем моря 630 м требуемый запас прочности защиты составляет (1 + 0,5)x1,080 = 1,134. Для внутренней изоляции минимальный запас прочности обусловлен 15%, и в этом случае поправочный коэффициент не применяется. Таким образом, для трансформатора требуется минимальный запас прочности, равный (1 + 0,15) = 1,15. В этом случае при возникновении грозовых перенапряжений величина напряжения, измеренного в различных точках подстанции, должна быть ниже 1425/1,134 = 1255 кВ$_{пик}$, а на выводах трансформатора она должна быть ниже 1425/1,15 = 1240 кВ$_{пик}$. Анализ должен гарантировать, что уровень перенапряжения на выводах оборудования меньше этого значения для всех случаев грозового перенапряжения.

АНАЛИЗ КОНКРЕТНЫХ ПРИМЕРОВ

Величина перенапряжения в любой точке является сочетанием случайного скачка напряжения и волн, отражённых от различных точек системы. Для проверки эффекта отражённых волн в различных точках были рассмотрены различные варианты разрядников для защиты от грозовых перенапряжений.

Во время исследований грозовых перенапряжений были проанализированы следующие ситуации:

- подстанции без разрядников на выводах блока генератор—трансформатор и выводах со стороны линии;
- подстанции с установленными разрядками на выводах блока генератор—трансформатор и выводах со стороны линии.

Впоследствии для анализа воздействия перенапряжений исследования были сосредоточены на трёх выводах: блока генератор—трансформатор, главной шины, со стороны отходящей линии.

Рассматриваемые примеры представлены в таблице.

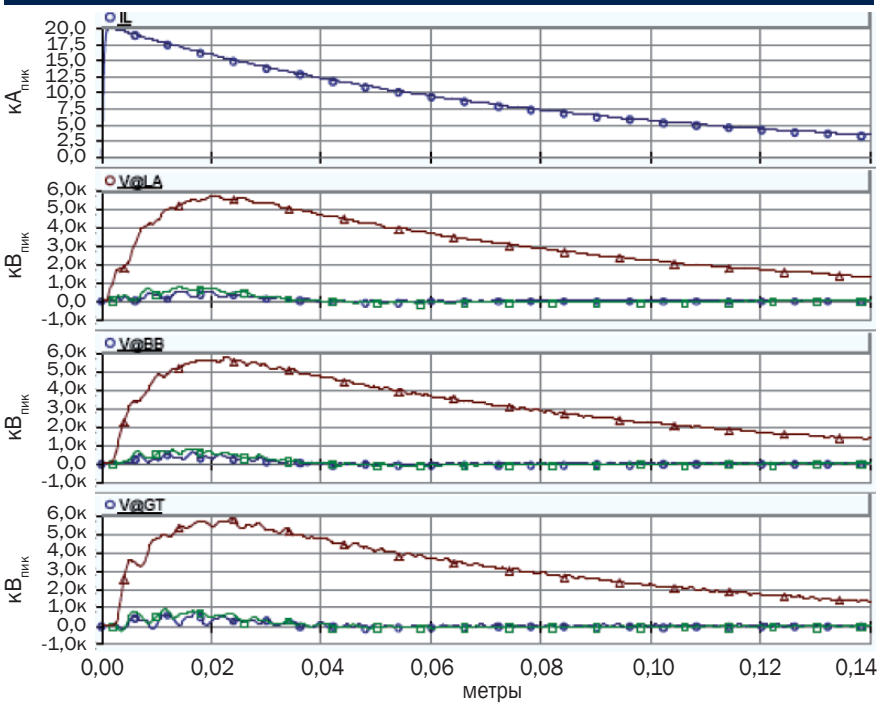
Пример 1. Предположим, что удар молнии произошёл на расстоя-

Табл. Измеренные значения в различных примерах

Описание	На стороне генератор—трансформатор			На стороне отходящей линии		
	кВ	кДж	кА	кВ	кДж	кА
Пример 1	5824,6	—	—	5711,64	—	—
Пример 2	683,31	316,71	6,868	618,66	356,32	18,79

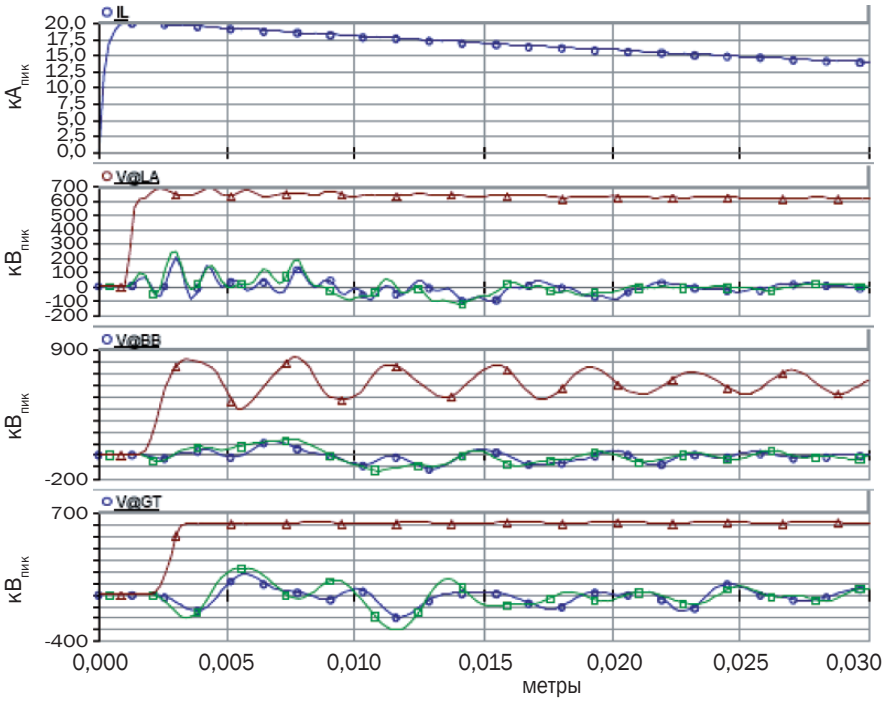
нии 300 м от подстанции и грозовое перенапряжение перемещается в сторону подстанции. В этом примере какие-либо разрядники на подстанции и выводах блока генератор—трансформатор отсутствуют. Модель системы для примера 1 представлена на рис. 1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пик перенапряжения на выводах блока составил 5824,6 кВ, а на выводах со стороны линии — 5711,64 кВ. На рис. 2 показаны значения напряжения в различных местах подстанции.

Рис. 2. Значения напряжения в различных местах подстанции (пример 1)



Пример 1. Котешвар: анализ грозовых перенапряжений (без грозоразрядников на выводах блока генератор—трансформатор и выводах отходящей линии).

Рис. 3. Значения напряжения в различных местах подстанции (пример 2)



Пример 2. Котешвар: анализ грозовых перенапряжений (с грозоразрядниками на выводах блока генератор—трансформатор и выводах отходящей линии)

Пример 2. Предположим, что удар молнии произошёл на расстоянии 300 м от подстанции и перенапряжение перемещается в сторону подстанции. В этом примере на подстанции установлены разрядники на выводах отходящей линии передачи и на выводах трансформатора. Модель системы для примера 2 показана на рис. 4.

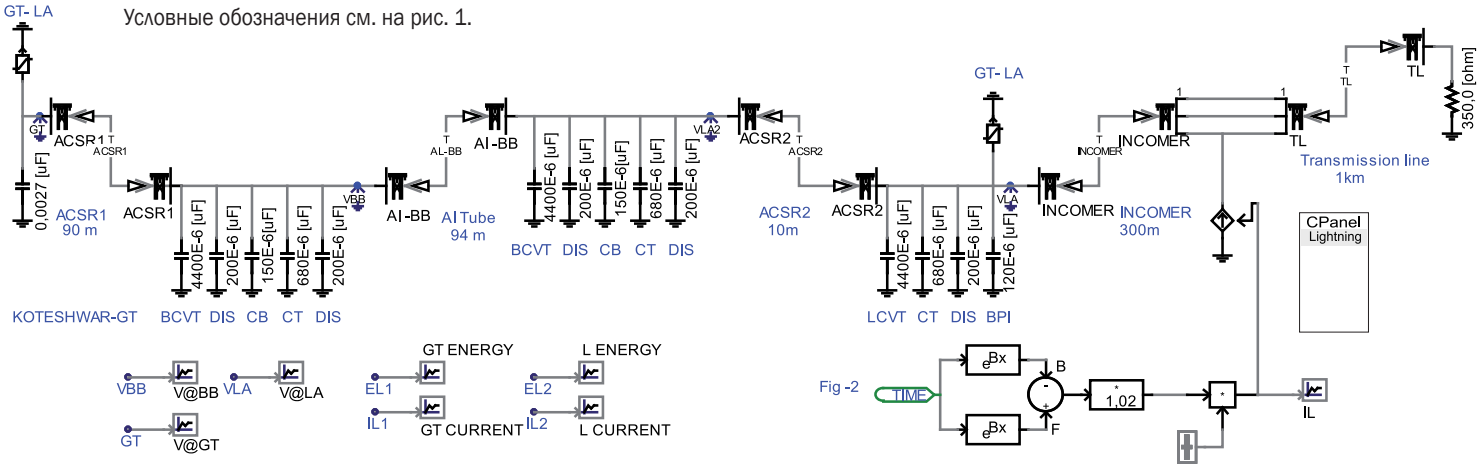
В результате измерений на выводах блока генератор—трансформатор зафиксировано максимальное перенапряжение 683,31 кВ. Поскольку номинальное импульсное выдерживаемое напряжение подстанции при ударах молнии составляет 1425 $кВ_{пик.}$, самый нижний предел грозового перенапряжения при запасе прочности 20% составляет 1140 кВ, что меньше нашего измеренного значения. Отмечено, что разрядники обеспечивают достаточный запас прочности для различных типов оборудования. На рис. 3 показано напряжение в различных точках подстанции, а на рис. 5 — ток разряда и рассеяние мощности через разрядники, подключённые к системе.

По результатам рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что грозоразрядники на выводах блока генератор—трансформатор и выводах отходящей линии контролируют перенапряжения со стороны линии. В первом примере напряжение, измеренное на выводах распредустройств и блока генератор—трансформатор, выходит за установленные пределы (1140 кВ). Если соединить грозоразрядники на выводах распредустройств со стороны линии с грозоразрядниками на выводах блока генератор—трансформатор, то величина напряжения, измеренного в этой точке, снижается до 618,66 кВ и 683,31 кВ соответственно, что не выходит за установленные пределы. В таблице представлены значения разрядного тока и мощности рассеяния через грозоразрядники.

ВЫВОДЫ

В работе представлено подробное моделирование подстанций для анализа грозовых перенапряжений. При помощи программного комплекса PSCAD/EMTDC показаны результаты моделирования грозовых перенапряжений, поступающих на подстанцию. На двух примерах

Рис. 4. Модель системы для примера 2

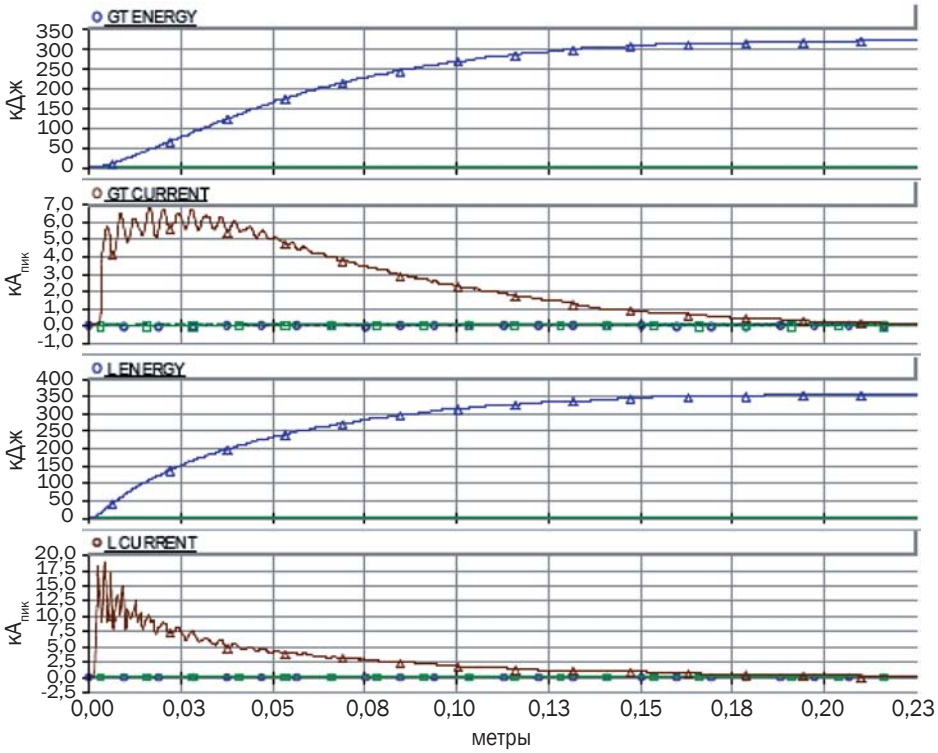


были проведены исследования для определения номинальных характеристик и местоположения грозоразрядников. На основании этих исследований было отмечено, что для ограничения перенапряжений до безопасных пределов необходимо установить грозоразрядники 390 кВ на выводах блока генератор—трансформатор и выводах со стороны отходящей линии. Номинальная мощность грозоразрядников 390 кВ должна быть больше, чем 356,32/390 = 0,913 кДж/кВ, а наиболее подходящим является выбранный номинал 8 кДж/кВ. В качестве номинального разрядного тока грозоразрядника было выбрано значение 20 кА.

Для получения достаточной степени защиты трансформатора и другого оборудования подстанции грозоразрядники должны устанавливаться в следующих точках подстанции:

- вблизи любого трансформатора;
- на всех вводах входящих и отходящих линий подстанции.

Рис. 5. Ток разряда и рассеяние мощности через грозовые разрядники (пример 2)



Пример 2. Котешвар: анализ грозовых перенапряжений (с грозоразрядниками на выводах блока генератор—трансформатор и выводах отходящей линии)

КОММЕНТАРИЙ:

Михаил Шамис, генеральный директор ЗАО «ЭнЛАБ», к.т.н.

Оценка уровня перенапряжений, возникающих на ПС при ударе молнии, определение технических решений, обеспечивающих защиту оборудования от указанных перенапряжений, всегда представляли собой весьма сложные и трудоёмкие задачи. Данная статья индийских специалистов из компании “Bharat Heavy Electricals Limited” убедительно показывает высокую эффективность применения для решения указанных задач программного комплекса PSCAD™, разработанного в компании “Manitoba HVDC Research Centre”. Позволяя учесть геометрию опор и тросового молниеотвода, распределённость параметров ВЛ, наличие паразитных ёмкостей у подстанционного оборудования, комплекс PSCAD формирует полноценное отображение переходных процессов при ударе молнии. Отмеченное существенно повышает обоснованность выбора ОПН и других видов грозозащитного оборудования.