

**Оценка защищенности оборудования подстанций
от грозовых перенапряжений и анализ требований ПУЭ
в части расстановки защитных аппаратов
(Дмитриев М.В.)**

1. Введение

Анализ грозовых перенапряжений на оборудовании ПС может проводиться одним из следующих способов:

- расчетом перенапряжений и их сравнением с допустимыми для изоляции оборудования уровнями, которые принимаются несколько ниже, чем испытательные напряжения изоляции по ГОСТ 1516.3-96;
- оценкой числа лет безаварийной работы оборудования при грозовых перенапряжениях и ее сравнением с рекомендуемыми значениями, приведенными, например, в [1];
- сравнением расстояний от оборудования до защитных аппаратов с допустимыми по ПУЭ [2] значениями.

2. Расчет грозовых перенапряжений на подстанции

Рассмотрим анализ грозовых перенапряжений на примере ОРУ 500 кВ подстанции «Луч» (МЭС Центра).

Схема ОРУ 500 кВ приведена ниже (рис.1). В рассматриваемой схеме установлено 4 комплекта защитных аппаратов (у АТ-1,2,3 и на ВЛ «Луч – Нижегородская»). Расстояние от АТ до соответствующего защитного аппарата одинаково для всех АТ и составляет 27 м. Расстояние от ТН-500 кВ на ВЛ «Кострома – Луч» до ближайшего защитного аппарата (защитный аппарат АТ-1) составляет 200 м.

Упрощенно будем считать, что все четыре защитных аппарата имеют близкие друг другу вольтамперные характеристики в режиме ограничения грозовых перенапряжений. Расчеты проведем для нескольких значений остающегося напряжения на защитном аппарате (импульс 8/20 мкс амплитудой 10 кА): 1200 кВ (у РВМГ-500 не более 1180 кВ, у РВМК-500 не более 1260 кВ); 1050 кВ и 900 кВ (современные ОПН).

Значение в 1200 кВ является близким к защитному уровню разрядников типов РВМГ-500 и РВМК-500. Значения 1050 кВ и 900 кВ перекрывают диапазон остающихся напряжений современных ОПН-500 кВ.

На рис.2-3 приведены осциллограммы перенапряжений на стороне 500 кВ автотрансформатора АТ-2 (один из трех установленных АТ) и на измерительном ТН-500 кВ, установленном на ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч». Рассмотрен частный случай: на ОРУ 500 кВ по ВЛ «Кострома – Луч» набегающая волна 2500 кВ с фронтом длительностью 1 мкс.

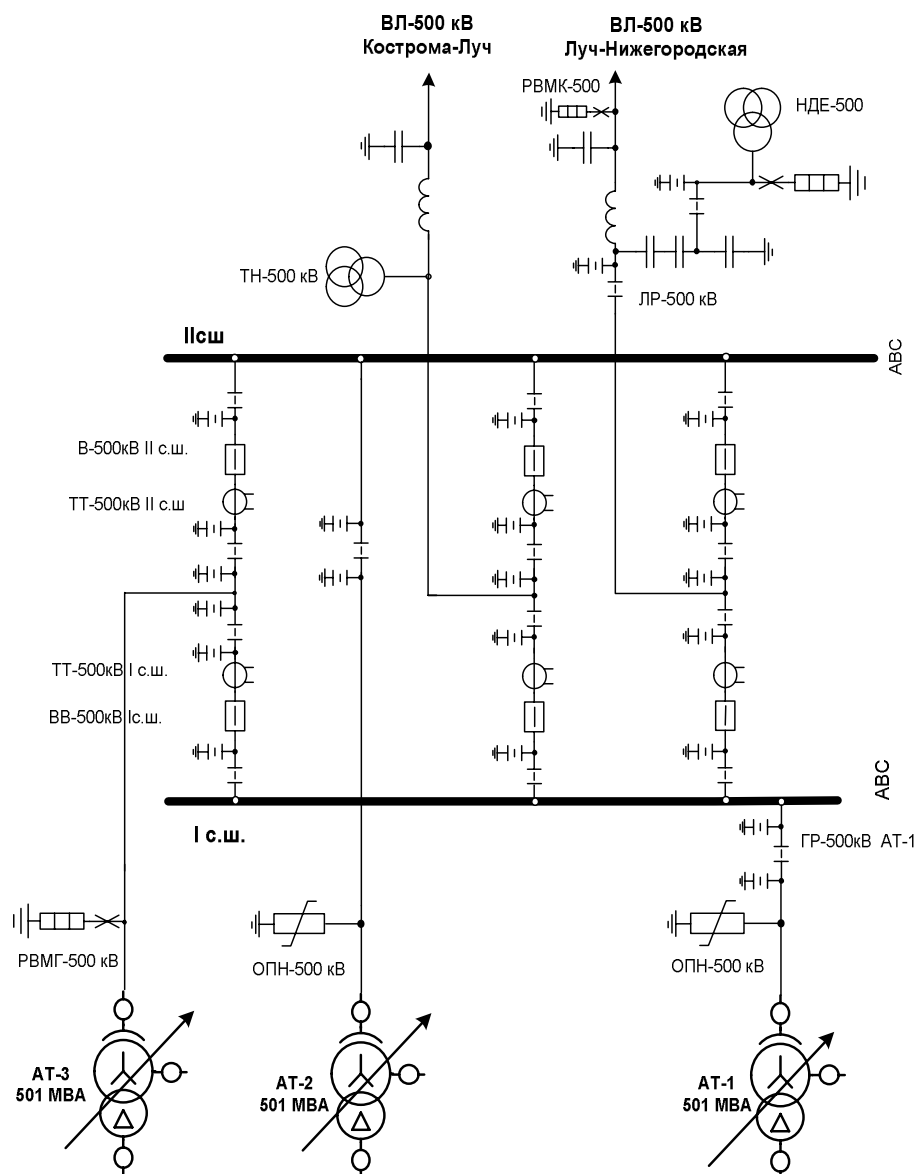


Рис.1. Схема ОРУ 500 кВ ПС «Луч» (МЭС Центра).

Из рис.2 видно, что при снижении защитного уровня ограничителей перенапряжений (разрядников) максимальные перенапряжения на АТ-2 снижаются. Разумеется, что на снижение перенапряжений на АТ-2 в первую очередь влияет снижение остающегося напряжения ближайшего к нему защитного аппарата. Учитывая это, снижение остающегося напряжения защитного аппарата у АТ-2 можно использовать для увеличения расстояния между АТ-2 и его защитным аппаратом. Следовательно, замена вентильного разрядника (установленного у АТ) на современный ОПН позволит увеличить допустимые расстояния между АТ и его защитным аппаратом.

Из рис.3 видно, что при снижении защитного уровня защитных аппаратов максимальные перенапряжения на ТН не изменяются. Влияние защитного уровня защитных аппаратов сказывается уже после того, как максимум перенапряжений на оборудовании достигнут. Вывод: замена даже всех вентильных разрядников в ОРУ на современные ОПН не позволяет

увеличивать допустимые расстояния до наиболее удаленного оборудования ОРУ.

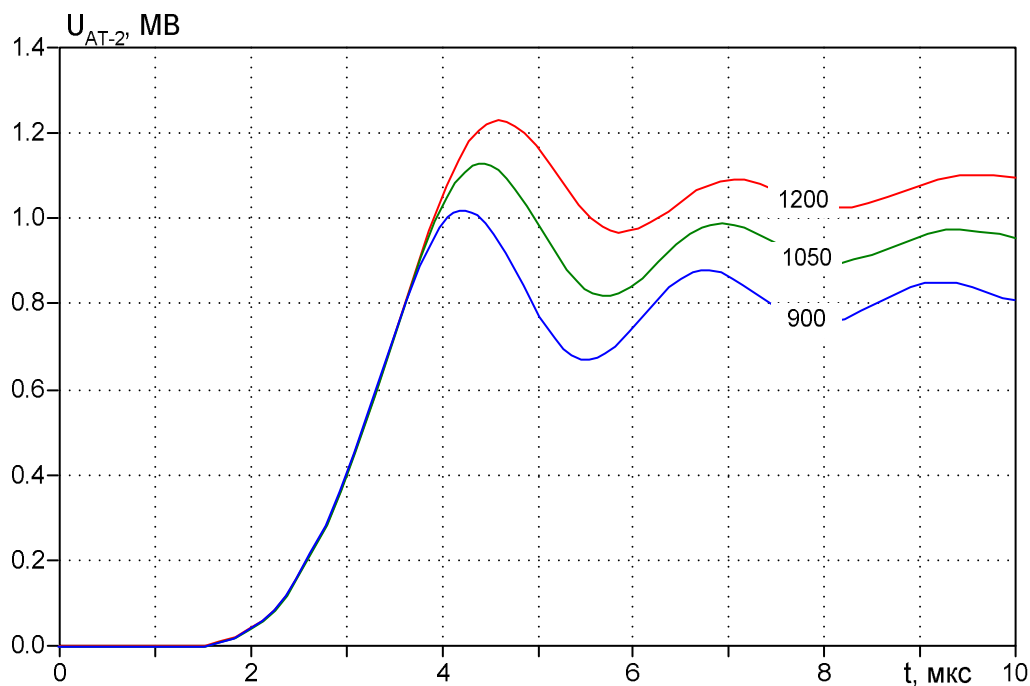


Рис.2. Перенапряжения на АТ-2 в зависимости от защитного уровня всех установленных в ОРУ защитных аппаратов (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

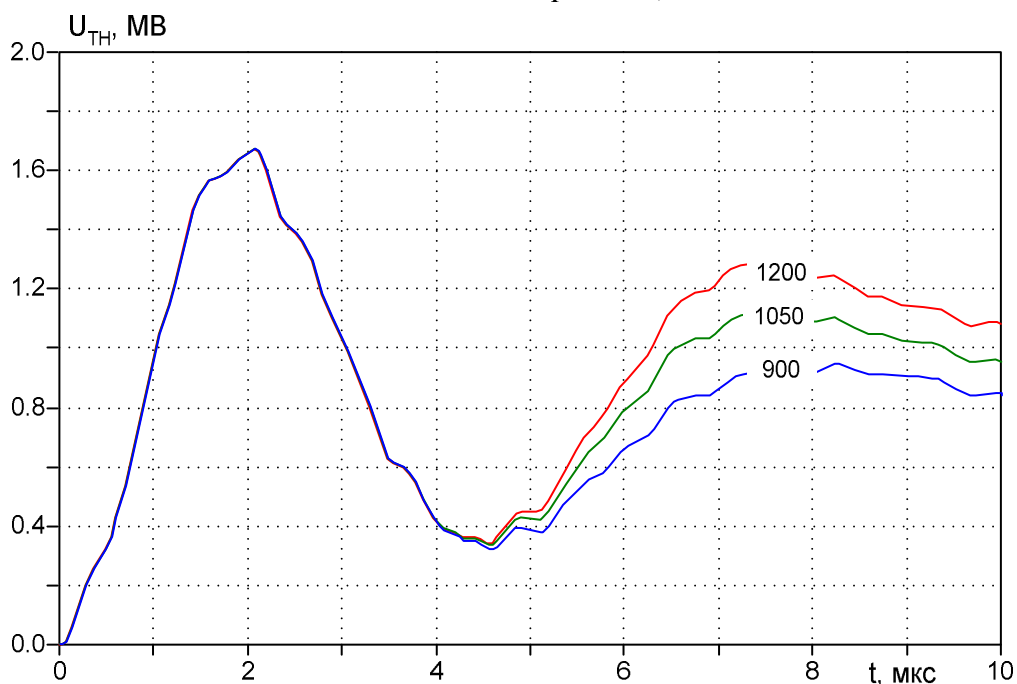


Рис.3. Перенапряжения на ТН в зависимости от защитного уровня всех установленных в ОРУ защитных аппаратов (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

Для того, чтобы учесть все возможные сочетания параметров набегающих на ОРУ грозовых волн (фронт, амплитуда, наличие среза), расчеты для ОРУ 500 кВ ПС «Луч» были проведены методом Монте-Карло: моделируется ПС и присоединенная ВЛ 500 кВ, в которую ударяет молния;

параметры молнии (фронт, амплитуда, длительность) выбираются случайным образом исходя из известных статистических закономерностей.

Для случая удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома – Луч» на рис.4 для некоторого оборудования ОРУ 500 кВ (для АТ-2, для КС и ТН, установленных на ВЛ «Кострома – Луч») приведены распределения вероятности появления перенапряжений выше заданного значения (откладываемого по оси абсциссе). На этих рисунках каждая из кривых получена по результатам статистических расчетов перенапряжений, вызванных 1000 ударами молнии в рассматриваемую точку присоединенной к подстанции ВЛ. Поэтому минимальная вероятность составляет $P_{M.КАРЛЮ} = 0.001$ (диапазон вероятностей $0.001 \div 0.01$ на рис.4 не показан). Вероятность $P_{M.КАРЛЮ}$ может быть пересчитана в число лет безаварийной работы, которое и является результатом анализа защищенности оборудования ОРУ от грозовых перенапряжений.

На рис.4 показаны три группы кривых (для АТ-2, для ТН, для КС) и допустимый уровень грозовых перенапряжений для измерительных ТН (для АТ допустимый уровень несколько ниже и не показан). В каждой группе кривых есть кривые, полученные для защитного уровня 1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ одновременно всех защитных аппаратов рассматриваемого ОРУ.

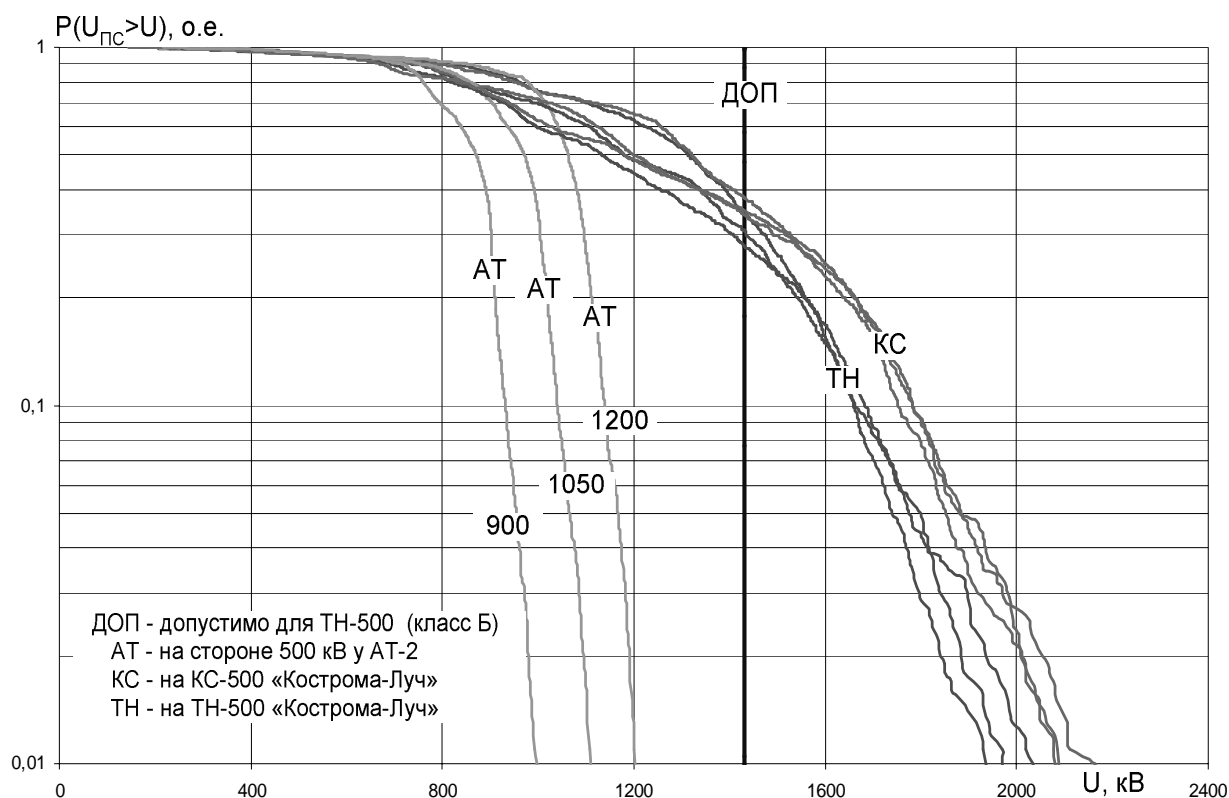


Рис.4. Распределение максимальных значений перенапряжений на оборудовании ОРУ 500 кВ (удар молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»).

Видно, что снижение остающегося напряжения защитных аппаратов приводит к снижению уровня максимальных грозовых перенапряжений на АТ. Однако снижение уровня максимальных грозовых перенапряжений на удаленном оборудовании (на ТН, на КС) практически не происходит, т.е. надежность их защиты от перенапряжений не изменяется.

Отсюда следует, что:

- при снижении остающегося напряжения защитных аппаратов, установленных в ОРУ, максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании снижаются;
- степень снижения грозовых перенапряжений на оборудовании (при заданном снижении остающегося напряжения защитных аппаратов) зависит от удаленности этого оборудования от защищенных аппаратов;
- наибольшее снижение перенапряжений достигается для силовых трансформаторов и автотрансформаторов;
- минимальное снижение перенапряжений характерно для наиболее удаленного от защитных аппаратов оборудования ОРУ.

3. Анализ требований ПУЭ в части выбора расстояний до ОПН

Изначально требования ПУЭ [2] в части грозозащиты ПС были сформулированы для случаев применения в качестве защитных аппаратов вентильных разрядников. В настоящее время основным защитным аппаратом от грозовых и коммутационных перенапряжений является ОПН. Для случаев применения ОПН предлагается допустимые по ПУЭ расстояния, полученные для вентильных разрядников, пересчитывать соразмерно с защитными характеристиками ОПН (остающимся напряжением в режиме ограничения грозовых перенапряжений).

В последней редакции ПУЭ в главе 4 в примечаниях к табл.4.2.10 (допустимые расстояния от вентильных разрядников до защищаемого оборудования) написано:

при использовании ОПН вместо РВ или при изменении испытательных напряжений защищаемого оборудования расстояние до силовых трансформаторов или другого электрооборудования определяется по формуле

$$L_{\text{ОПН}} = L_{\text{РВ}} \frac{U_{\text{исп}} - U_{\text{ОПН}}}{U_{\text{исп}} - U_{\text{РВ}}},$$

где $L_{\text{ОПН}}$ - расстояние от ОПН до защищаемого оборудования, м; $L_{\text{РВ}}$ - расстояние от разрядника до защищаемого оборудования, м; $U_{\text{исп}}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, кВ; $U_{\text{ОПН}}$, $U_{\text{РВ}}$ - остающееся напряжение на ОПН (РВ) при токе 5 кА - для классов напряжения 110-220 кВ; 10 кА - для классов напряжения 330 кВ и выше.

Как видно из ПУЭ, коэффициент пересчета расстояний $K = \frac{U_{исп} - U_{опн}}{U_{исп} - U_{рв}}$ одинаков вне зависимости от рассматриваемого оборудования и пересчитываемого расстояния $L_{рв}$.

Расчетами, проведенными выше на примере типовой ПС «Луч» (ОРУ 500 кВ) было показано, что коэффициент пересчета расстояний K принципиально зависит от удаленности защищаемого оборудования от защитного аппарата, т.е. от расстояния $L_{рв}$.

Несложно показать, что приведенная в ПУЭ формула достаточно точна в случае, когда пересчитывается расстояние от трансформатора до его защитного аппарата. Наибольшую же ошибку приведенная в ПУЭ формула даст при пересчете расстояний до наиболее удаленного оборудования подстанции.

В условиях ОРУ 500 кВ ПС «Луч» для наиболее удаленного оборудования (ТН-500 кВ на ВЛ «Кострома – Луч»): $U_{исп} = 1550$ кВ; $U_{рв} = 1200$ кВ; $U_{опн} = 900$ кВ; $K = 1.86$ раза.

По результатам анализа перенапряжений рис.3-4 ясно видно, что максимальные грозовые перенапряжения на удаленном оборудовании ОРУ (для ПС «Луч» 200 метров) практически не зависят от остающегося напряжения защитных аппаратов, установленных ОРУ (от типа защитного аппарата), и, следовательно, не могут быть увеличены (после замены РВ на ОПН), так как это снизит защищенность удаленного оборудования от грозовых перенапряжений (особенно, если расстояния увеличить практически в 2 раза, как это дает формула ПУЭ).

Поэтому допустимые по ПУЭ расстояния от защитных аппаратов до наиболее удаленного оборудования не могут быть увеличены после замены РВ на ОПН, так как это приведет к снижению защищенности оборудования от грозовых перенапряжений. При этом ошибка, допущенная ПУЭ (в ПУЭ $K = const(L_{рв})$, а реально $K \neq const(L_{рв})$), будет тем существеннее, чем более глубоко устанавливаемый ОПН ограничивает грозовые перенапряжения: чем ниже $U_{опн}$, тем большее значение K получается.

Вместе с тем, вне зависимости от остающегося напряжения на ОПН, скорость распространения электромагнитной волны вдоль ошиновки ОРУ не превосходит $v = 300$ м/мкс. Чтобы оборудование, расположенное до защитного аппарата по ходу набегающей с ВЛ на ОРУ грозовой волны, хотя бы «узнало» о наличии в глубине ОРУ защитного аппарата, необходим интервал времени $2\tau = 2L/v$ (L - расстояние от рассматриваемого оборудования до ближайшего защитного аппарата).

Если $L = 150$ м, то $2\tau = 1$ мкс и рассматриваемое удаленное оборудование, расположенное до защитного аппарата по ходу набегающей с линии волны, в течение 1 мкс вообще не будет знать о наличии защитного аппарата в схеме. Чтобы защитный уровень защитного аппарата успел сказаться на уровне грозовых перенапряжений на удаленном оборудовании, необходим интервал времени, соответствующий нескольким интервалам 2τ

(нескольким циклам отражений-преломлений волн между рассматриваемым удаленным оборудованием и защитным аппаратом). Учитывая такую большую задержку во вступлении защитных аппаратов в работу по ограничению перенапряжений на удаленном оборудовании (см. рис.3), максимальные грозовые перенапряжения на удаленном оборудовании ОРУ уже будут достигнуты.

Иными словами: чем ниже остающееся напряжение, тем больше по ПУЭ можно увеличить максимальные допустимые расстояния до наиболее удаленного оборудования, и тем менее это будет соответствовать реальному положению дел с грозовыми перенапряжениями на подстанции.

В подтверждение изложенному выступает примечание к табл.4.2.8 в главе 4 из ПУЭ 6.0:

*«При использовании разрядников I группы вместо разрядников II группы по ГОСТ 16357-70 * расстояния до силовых трансформаторов 150-220 кВ с уровнем изоляции по ГОСТ 1516.1-76 * могут быть увеличены в 1,5 раза».*

Это примечание означает, что при использовании у трансформатора защитного аппарата со сниженным остающимся напряжением пересчитывать расстояние можно только до силового трансформатора, а не для всего оборудования ОРУ, как это делается в ПУЭ 7.0 и «Методических указаниях».

Повторно хотим отметить, что ОРУ 500 кВ ПС «Луч» является примером типовой ПС, и, следовательно, затронутые здесь вопросы корректности применения рекомендаций ПУЭ и Указаний касательно увеличения расстояний существенны, не могут быть оставлены без внимания и требуют детального всестороннего обсуждения.

Дополнительно отметим, что все расчеты грозовых перенапряжений принципиально должны проводиться при моделировании волновых процессов. Моделирование схем ПС при помощи L-C цепочек может использоваться лишь для оценочных расчетов, так как приводит к занижению максимальных грозовых перенапряжений на оборудовании [3].

4. Анализ требований ПУЭ в части грозозащиты ОРУ 110-220 кВ

В ПУЭ 6.0 и 7.0 в главе 4 есть примечание (к табл.4.2.8 в ПУЭ 6.0 и к табл.4.2.10 в ПУЭ 7.0):

Расстояния от вентильных разрядников до электрооборудования, кроме силовых трансформаторов, не ограничиваются при количестве параллельно работающих ВЛ: на напряжении 110 кВ - 7 и более; 150 кВ - 6 и более; 220 кВ - 4 и более.

Это примечание, может показаться, снимает для ОРУ 110-220 кВ поставленный вопрос относительно допустимости увеличивать максимальные расстояния при замене РВ на ОПН. Дело в том, что большие расстояния до наиболее удаленного оборудования ОРУ могут быть только в ОРУ с большим числом присоединенных ВЛ. Для большого же числа присоединенных ВЛ расстояния согласно ПУЭ вообще не ограничиваются и,

следовательно, нельзя говорить об ошибке увеличения допустимых расстояний при замене РВ на ОПН.

Типовые ОРУ 110-220 кВ, как правило, выполняются по схеме «две системы шин с обходной» (между шинный выключатель нормально замкнут). При этом часть ВЛ 110-220 кВ оказывается присоединенной к 1СШ, а часть ко 2СШ. Соседние ВЛ могут быть присоединены к одним и тем же сборным шинам на большом расстоянии друг от друга (считая вдоль сборных шин), а могут быть в соседних ячейках.

Учитывая реальные габариты ОРУ 110-220 кВ с большим числом присоединений, линии, присоединенные к одной системе шин, физически (скорость волны конечна) не успевают снизить грозовые перенапряжения на оборудовании другой системы шин и оборудовании линейных ячеек присоединенных к ней ВЛ. Кроме того, линии присоединенные даже к одной и той же системе сборных шин (нередко длина сборных шин более 200 м) физически не успевают (скорость волны не более 300 м/мкс) повлиять на перенапряжения на другом конце сборных шин.

Поэтому, не только удаленный РВ и ОПН слабо влияет на перенапряжения, но и большое число присоединенных к сборным шинам линий слабо влияет на перенапряжения, по крайней мере, на оборудовании линейной ячейки пораженной молнией ВЛ (выключатель, трансформатор тока, разъединители и опорные изоляторы). Естественно, в роли пораженной молнией ВЛ может оказаться любая ВЛ, присоединенная к рассматриваемому ОРУ. Это означает, что даже при большом числе присоединенных линий максимально допустимые расстояния до удаленного оборудования должны быть ограничены (в ПУЭ они не ограничены).

Следует понимать, что увеличение числа присоединенных линий пропорционально увеличивает число грозовых волн, которые могут в разное время набегать по этим линиям на ОРУ.

Помимо этого, число набегающих на ОРУ 110-220 кВ грозовых волн существенно зависит от импульсного сопротивления ближайших к ОРУ опор ВЛ 110-220 кВ (см. действующий нормативный документ [1], см. работу [4], в которой в том числе проанализировано влияние сопротивления заземления на число обратных перекрытий ВЛ 110 кВ, т.е. на число набегающих на ОРУ грозовых волн). В ПУЭ же допустимые расстояния между оборудованием и защитными аппаратами никак не зависят от сопротивления заземления опор ВЛ на подходах к ПС. Указано лишь, что в зависимости от удельного сопротивления грунта (до 100 Ом·м, 100-500 Ом·м, более 500 Ом·м) сопротивление заземления опор должно быть не более 10, 15 или 20 Ом.

В публикациях [5-6] (автор которых Гумерова Н.И. отмечает в своих работах необходимость пересмотра ПУЭ) утверждается, что требования ПУЭ были сформулированы на основе расчетов, которые проведены для нулевого сопротивления заземления опор. Однако несложно показать, что получаемая надежность защиты оборудования ОРУ 110-220 от грозовых перенапряжений зависит от сопротивления заземления ближайших к ПС опор, снижаясь с ростом сопротивления заземления. Требования ПУЭ этого никак не

отражают (Гумерова Н.И. предлагает поставить требования ПУЭ к расстояниям в зависимости от сопротивления заземления опор на подходах ПС и от активности грозовой деятельности в районе ПС, выражаемой числом грозových часов в год).

Учитывая все перечисленное, можно предположить, что защищенность наиболее удаленного оборудования ОРУ 110-220 кВ с большим числом присоединенных ВЛ 110-220 кВ и с большой протяженностью сборных шин может быть недостаточна. Таким образом, с привлечением специалистов по расчету грозových перенапряжений на ПС необходимо рассмотреть вопрос об ограничении максимально допустимых расстояний до защищаемого оборудования даже в случае, когда число присоединенных к ОРУ 110, 150, 220 кВ воздушных линий 110, 150, 220 больше указанного в ПУЭ 7.0 значения (7, 6, 4 соответственно).

5. Выводы

Приведенные выше результаты расчетов грозových перенапряжений на оборудовании ПС показывают необходимость корректировки указанных в ПУЭ требований по количеству защитных аппаратов в РУ и допустимым расстояниям от защитных аппаратов до оборудования.

Литература

- [1] РАО «ЕЭС России». «Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений». Санкт-Петербург, Издательство ПЭИПК, 1999.
- [2] Правила устройства электроустановок. 7-е издание.
- [3] «Максимальные кратности грозových перенапряжений на подстанции». Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Известия академии наук. Энергетика, №2, 2004.
- [4] «Электричество», №6, 2004. «Оценка влияния импульсной прочности линейной изоляции на грозоупорность линий электропередачи 110 кВ». А.Р. Корявин, О.В. Волкова, В.З. Трифонов.
- [5] Гумерова Н.И. «Проектирование грозозащиты ОРУ станций и подстанций». – Сборник докладов восьмой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности, С-Пб, 2004.
- [6] Другие статьи Гумеровой Н.И., опубликованные, в частности, в сборнике докладов той же конференции, С-Пб, 2004.