

В статье «Защищенные подходы к РУ» [1] были сформулированы предложения по корректировке ряда разделов ПУЭ в части защиты изоляции распределительных устройств от грозовых перенапряжений. Выводы авторов, касающиеся пересмотра ПУЭ, не вызывают возражений. Необходимость подобной корректировки обсуждается давно как на различных конференциях, так и на страницах периодических изданий (см. например [2]).

Вывод же о том, что «не рекомендуется установка ОПН на подходах ВЛ к подстанции», сформулированный в [1], по мнению Михаила Викторовича Дмитриева, может быть неверно истолкован и требует развернутых комментариев.

УСТАНОВКА ОПН НА ПОДХОДАХ ВЛ К РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВАМ



Михаил Дмитриев,
к.т.н., заместитель генерального
директора по научной работе
ПКБ «РосЭнергоМонтаж»,
г. Санкт-Петербург

Авторы [1] ведут исследования грозозащиты распределительных устройств уже не первое десятилетие, имеют большое число печатных работ и докладов по этой тематике [3 и др.]. Однако используемое ими для расчетов грозовых перенапряжений программное обеспечение является отчасти закрытым, т.е. его не так просто приобрести и освоить.

В этом смысле всемирно известная программа ЕМТР, по моему мнению, обладает рядом весомых преимуществ: распространяется за весьма умеренную плату, проверена инженерами разных стран, проста и удобна в использовании. Примеры того, как с помощью ЕМТР можно проводить расчеты грозовых перенапряжений на линиях и в распределительных устройствах (РУ), приведены в [4, 5].

Ниже на основе результатов моделирования в ЕМТР поясняется сделанный в [1] вывод о том, что на подходах ВЛ к подстанции не рекомендуется устанавливать нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

КАСКАДНАЯ СХЕМА ЗАЩИТЫ РУ

Подход к РУ одноцепной воздушной линии (ВЛ) с одним молниезащитным тросом схематично показан на рис. 1. В сетях 35–750 кВ основными источниками опасных для изоляции оборудования РУ грозовых перенапряжений являются происходящие на подходах ВЛ к РУ прорывы молнии мимо тросовой защиты на фазные провода (1), а также разряды молнии в опоры (2) и тросы (3) с последующим перекрытием изоляции с заземленного тела опоры на фазные провода (такие перекрытия называются обратными).

Для минимизации числа грозовых волн, которые образуются на подходах ВЛ и способны вызвать в РУ опасные грозовые перенапряжения, на практике должен реализовываться комплекс мероприятий:

- снижение числа ударов молнии в фазные провода, достигаемое за счет установки тросовой защиты, оптимизации числа тросов и их расположения на опоре;
- снижение числа обратных перекрытий изоляции при разрядах в опоры и тросы, достигаемое за счет снижения импульсного сопротивления заземления опор.

Исследования [1] и [4] независимо друг от друга показали, что требования ПУЭ к длине подходов ВЛ к РУ, на которых следует реализовать отмеченный комплекс мер, излишне жесткие: для обеспечения достаточной защиты изоляции оборудования трос (тросы) и хорошее заземление должны быть предусмотрены на примыкающем к РУ участке ВЛ длиной не более 0,5–1,5 км, тогда как по ПУЭ – до 4–5 км.

Кроме организации подходов ВЛ, защищенность оборудования РУ определяется еще одним фактором – рациональным выбором мест установки ОПН и характеристик этих устройств (остающегося напряжения при протекании импульсных токов).

Остающееся на ОПН напряжение достаточно жестко связано с наибольшим рабочим напряжением ОПН ($U_{нРО}$) и весьма слабо зависит от других характеристик ОПН, например, таких как энергоемкость. Поскольку сегодня в РФ на каждый класс

номинального напряжения сети существует «типовой ОПН» с определенным значением $U_{нРО}$, то проведенное в [1] варьирование $U_{нРО}$ (а значит, и остающегося напряжения) отчасти лишено смысла. Так, в сетях 110 кВ сейчас повсеместно применяют ОПН с $U_{нРО} = 88$ кВ, а рассмотренное в [1] значение $U_{нРО} = 73$ кВ на практике встречается редко.

Учитывая изложенное, влияние на защищенность изоляции оборудования РУ оказывает не выбор характеристик ОПН (такого выбора, по сути, не существует), а выбор мест установки ОПН. Именно выбор числа и мест установки ОПН в РУ – это важнейшая задача грозозащиты.

В работах Н.И. Гумеровой, а также, например, в работе [4] было показано, что наиболее эффективная защита изоляции оборудования от грозовых перенапряжений обеспечивается так называемой каскадной схемой расстановки ОПН (рис. 2). Такая схема предполагает, что ОПН размещаются у выводов каждого силового трансформатора (Т) и на входе в РУ каждой присоединенной ВЛ, скажем, вблизи от линейного измерительного трансформатора напряжения (ТН).

ОПН1 в схеме на рис. 2 размещается на земле вблизи от трансформатора. Что касается ОПН2, то для него возможны два различных исполнения:

- обычное исполнение (на земле на территории РУ по аналогии с ОПН1);
- подвесное исполнение (на ближайшей к РУ опоре ВЛ так, как показано на рис. 3).

Подвесной ОПН удобно разместить на опоре ВЛ (опора № 1 на рис. 1), так как он не занимает места на земле, не требует фундамента или подставки. По всей видимости, именно к такому исполнению входного ОПН относится фраза из [1] «не рекомендуется установка ОПН на подходах ВЛ к подстанции». Попытаемся понять, почему подвесное исполнение ОПН2 хуже, чем обычное исполнение ОПН2.

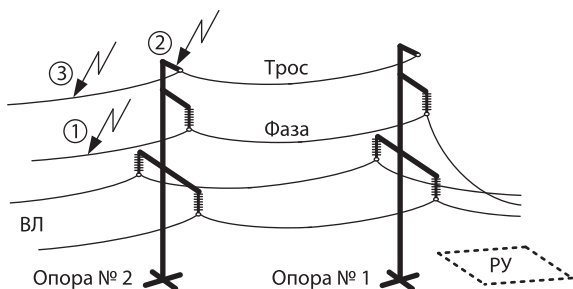
НЕДОСТАТКИ ПОДВЕСНОГО ОПН НА ВХОДЕ РУ

Очевидным недостатком подвесного исполнения ОПН, размещенного высоко над землей на опоре ВЛ, является повышенная длина пути тока в землю, а значит, повышенная индуктивность цепи подключения ОПН (рис. 4) в сравнении со случаем размещения ОПН на земле под ошиновкой РУ. Отмеченная индуктивность дает дополнительное падение напряжения в цепи ОПН, повышает напряжение в точке подключения ОПН к фазному проводу, снижает эффективность ограничения перенапряжений на изоляции оборудования.

Другим, менее очевидным, недостатком подвесного исполнения ОПН является занос высокого импульсного потенциала с тела опоры в фазные провода, о котором как раз и пишут авторы [1].

Дело в том, что появление подвесного ОПН принципиально меняет механизм возникновения потенциала на фазном проводе, а следовательно, меняет величину и форму импульса напряжения, который будет распространяться вдоль ВЛ от места разряда молнии в сторону РУ, создавая там грозовые перенапряжения на изоляции оборудования.

Подход линии к распределительному устройству Рис. 1 •



Каскадная схема грозозащиты оборудования РУ Рис. 2 •

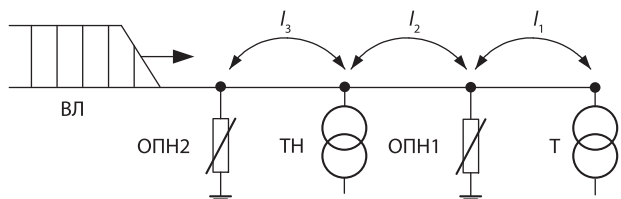
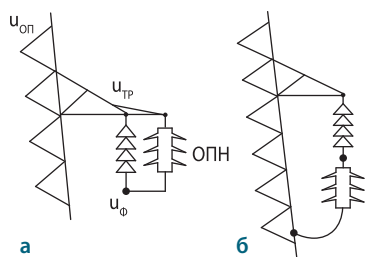
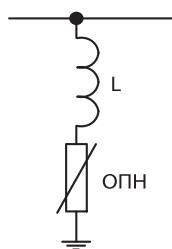


Рис. 3. Размещение ОПН на входной опоре ВЛ:
а) жесткое крепление на траверсу;
б) подвес на фазный провод

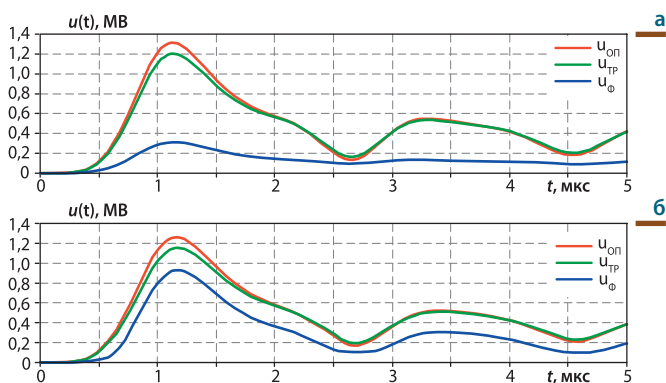


ОПН и индуктивность в цепи его присоединения Рис. 4 •



Осциллограммы потенциалов при разряде молнии 3/100 мкс 50 кА в опору ВЛ 110 кВ с сопротивлением заземления 10 Ом:

а) ОПН не установлен, перекрытия изоляции нет;
б) ОПН установлен



Для изучения этого механизма рассмотрим разряд молнии в опору одноцепной ВЛ 110 кВ с тросом (рис. 1), для начала – вдали от РУ. При разряде в опору ток молнии проходит по ее телу в заземляющее устройство, обуславливая потенциал вершины опоры $u_{оп}$, потенциал траверсы $u_{тр}$ и фазного провода $u_{ф}$ (будем говорить о верхней траверсе и ее фазном проводе).

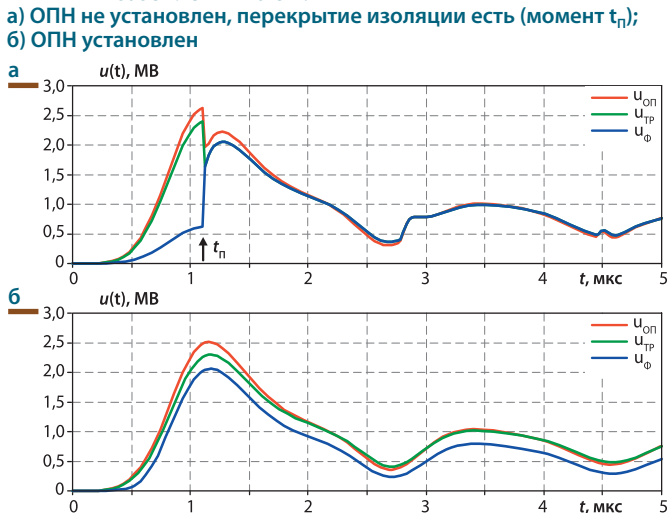
На рис. 5 показаны расчетные ЕМТР-осциллограммы $u_{оп}$, $u_{тр}$, $u_{ф}$ при разряде в опору молнии 50 кА (форма 3/100 мкс). Такая молния не привела к появлению между фазным проводом и траверсой разности потенциалов ($u_{ф} - u_{тр}$), достаточной для перекрытия гирлянды изоляторов с учетом ее вольт-секундной характеристики.

На рис. 5а потенциал фазного провода $u_{ф}$ достигает 300 кВ и связан с наводками от троса, присоединенного к вершине

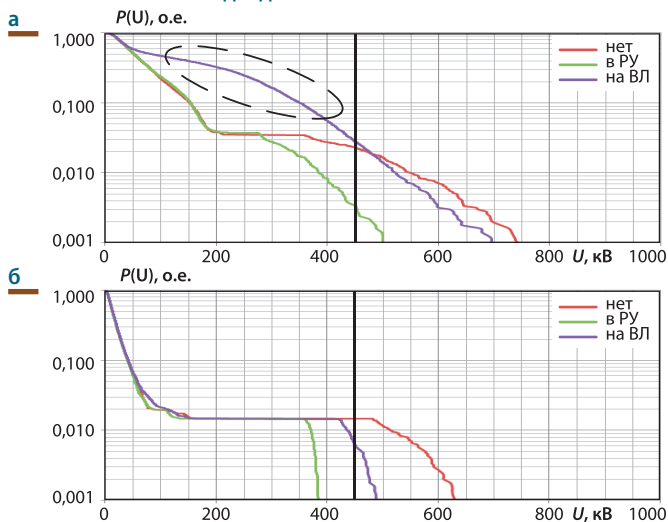
• Таблица 1. Потенциал фазного провода при разрядах молнии в опору

№	Перекрытие	ОПН	Рисунок	Формула
1	не было	не было	5а	$u_{\phi} = (0,20 - 0,25) \cdot u_{TR}$
2		установили	5б	$u_{\phi} = u_{TR} - u_{OCT}$
3	было	не было	6а	$u_{\phi} = u_{TR}$
4		установили	6б	$u_{\phi} = u_{TR} - u_{OCT}$

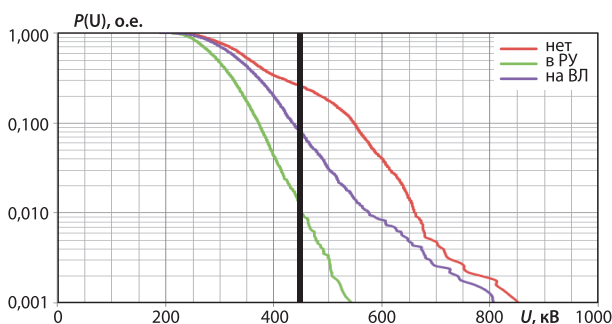
• Рис. 6. Осциллограммы потенциалов при разряде молнии 3/100 мкс 100 кА в опору ВЛ 110 кВ с сопротивлением заземления 10 Ом:



• Рис. 7. Разряд молнии на входе РУ 110 кВ в вершину опоры № 1 (а) или № 2 (б) ВЛ 110 кВ с сопротивлением заземления 10 Ом. Варьируется место установки ОПН на подходе



• Рис. 8. Разряд молнии на входе РУ 110 кВ в фазный провод рядом с опорой № 1. Варьируется место установки ОПН на подходе



опоры ВЛ и расположенного параллельно фазному проводу. Соотношение потенциалов провода и троса постоянно и зависит от их взаимного расположения на опоре. Здесь, как видно, u_{ϕ} составляет 0,23 от потенциала опоры (троса) $u_{оп}$ или 0,25 от потенциала траверсы u_{TR} .

На рис. 5б при наличии ОПН потенциал фазного провода достигает 900 кВ и связан с тем, что ток молнии стекает с тела опоры не только в землю, но и через ОПН в фазный провод. Как видно, u_{ϕ} всегда меньше u_{TR} на одну и ту же величину u_{OCT} , равную остающемуся напряжению типового ОПН 110 кВ (это около 250 кВ). Анализ рис. 5 показал, что ОПН, подвешенный на опоре ВЛ, при ударе молнии в эту опору увеличивает u_{ϕ} , и в результате можно ожидать роста перенапряжений в РУ.

Эффект, аналогичный заносу высокого потенциала в фазный провод через ОПН, создается при разряде молнии в опору и обратном перекрытии изоляции с траверсы на фазный провод ВЛ, ведь шунтирующая изоляцию дуга – это все равно что ОПН с минимальным (нулевым) остающимся напряжением. Поэтому если до установки ОПН уже были перекрытия изоляции, то появление ОПН практически не изменит величину и форму u_{ϕ} (см. рис. 6а и 6б, на которых u_{ϕ} похожи и по величине (2 МВ), и по форме).

Результаты анализа осциллограмм на рис. 5–6 (табл. 1) говорят о том, что при разрядах в опоры появления подвешенного ОПН приводит к заметному росту u_{ϕ} лишь в тех случаях, когда до установки ОПН перекрытия изоляции не было. Если до установки ОПН перекрытия изоляции были, то появление ОПН практически не изменит u_{ϕ} . Всё это несложно понять, если учесть, что для большинства молний $u_{TR} > u_{OCT}$ или $u_{TR} \gg u_{OCT}$, т.е. в первой строке табл. 1 напряжение на фазе достигает 0,2–0,25 от u_{TR} , а в остальных оно или равно u_{TR} , или очень близко к u_{TR} .

Следовательно, установка подвешенного ОПН на входе РУ способна негативно сказаться на грозозащите РУ только у ВЛ с малым числом перекрытий изоляции при разрядах в опоры и тросы:

- ВЛ с условно низким сопротивлением заземления;
- ВЛ с условно большой прочностью изоляции.

Для подобных ВЛ появление на входе РУ подвешенного ОПН, образующего совместно с ОПН силового трансформатора каскадную схему, способно не улучшить, а ухудшить защищенность оборудования от грозовых перенапряжений. Однако окончательный ответ можно дать лишь на основе статистических расчетов грозовых перенапряжений на изоляции оборудования РУ. Их можно выполнить по методике, описанной в [4, 5], когда в ЕМТР производится серия расчетов, в каждом из которых разряд молнии со случайными параметрами происходит вблизи от входа в РУ в заданную точку линии – в опору, трос, фазный провод. Далее строятся кривые, представляющие вероятность превышения перенапряжениями на изоляции допустимого уровня, по ним определяется вероятность превышения этого уровня и в итоге оценивается число лет безаварийной работы РУ при грозе.

В качестве примера для простейшей тупиковой схемы РУ 110 кВ на рис. 7–8 даны результаты статистических расчетов в случае разряда молнии в опору № 1 (рис. 7а), в опору № 2 (рис. 7б), в фазный провод вблизи от опоры № 1 (рис. 8). Для краткости не будем приводить результаты расчетов при разрядах молнии в другие места подхода ВЛ.

В рассмотренной тупиковой схеме силовой трансформатор имеет свой ОПН (ОПН1 на рис. 2), который может быть дополнен еще одним ОПН (ОПН2 на рис. 2) для образования каскадной схемы. Поэтому на каждом из рис. 7–8 есть три кривые в зависимости от места установки входного ОПН:

- случай «нет» – ОПН отсутствует;
- случай «в РУ» – обычное размещение ОПН на земле;
- случай «на ВЛ» – ОПН подвешен на ближайшей к РУ опоре ВЛ (опора № 1 на рис. 1).

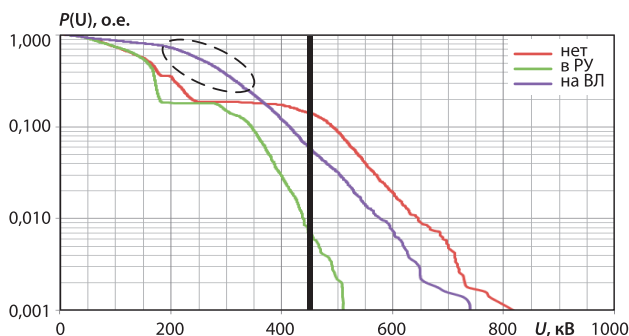
Горизонтальный участок на кривых «нет» и «в РУ» (см. рис. 7) означает резкий рост числа перекрытий изоляции линии, ведь именно при перекрытиях фазный провод скачком получает высокий потенциал траверсы и опоры.

Согласно рис. 7а существует следующая вероятность превышения грозowymi перенапряжениями допустимого для трансформатора уровня 450 кВ:

- 0,02 в случае без входного ОПН;
- 0,003 – входной ОПН размещен на земле;
- 0,03 – входной ОПН подвешен на ВЛ на опоре № 1.

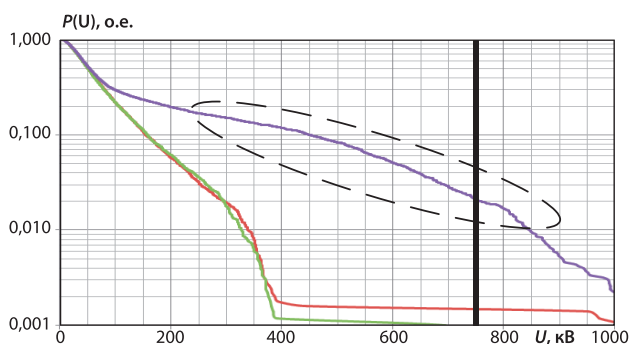
Разряд молнии на входе РУ 110 кВ в вершину опоры № 1 ВЛ 110 кВ с сопротивлением заземления 50 Ом. Варьируется место установки ОПН на подходе

Рис. 9 •



Разряд молнии на входе РУ 220 кВ в вершину опоры №1 ВЛ 220 кВ с сопротивлением заземления 10 Ом. Варьируется место установки ОПН на подходе

Рис. 10 •



Как видно, при размещении подвесного ОПН на входе РУ вероятность опасных перенапряжений (0,03) выше, чем в случае отсутствия ОПН (0,02), т.е. на первый взгляд грозозащита ухудшилась. Однако, если разряд молнии происходит не в опору с ОПН (опора № 1), а в другие опоры подхода (опора № 2, рис. 7б) или в фазный провод (рис. 8), то подвесной ОПН, наоборот, снижает вероятность возникновения опасных перенапряжений по сравнению со случаем, когда ОПН отсутствует. Из рис. 7–8 также следует, что снижение перенапряжений в РУ гарантируется лишь при использовании ОПН обычного (наземного) исполнения, а при использовании подвесного ОПН – должно проверяться расчетами.

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР И КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ

Зная конструкцию опор ВЛ и число грозовых часов в году, с помощью рис. 7–8 по методике [4] можно оценить число М лет безаварийной работы РУ при грозовых перенапряжениях. Однако уже ясно, что для рассмотренной тупиковой схемы РУ 110 кВ негативная роль ОПН (рис. 7а), подвешенного на подходе ВЛ, будет не так заметна в сравнении с положительным эффектом от его установки (рис. 7б и 8).

Негативную роль ОПН можно оценить по размеру области, (на рис. 7а отмечена пунктирной линией), где входной ОПН, размещенный на опоре ВЛ в РУ, дает повышенные перенапряжения в сравнении со случаем без входного ОПН. Так, грозовые перенапряжения величиной 200 кВ в случае без ОПН появляются с вероятностью 0,04, а с подвесным ОПН – с вероятностью 0,3, т.е. почти на порядок чаще. Несмотря на это, особого вреда от подвесного ОПН нет, поскольку указанная область на рис. 7а почти целиком лежит слева от уровня допустимых для изоляции трансформатора грозовых перенапряжений 450 кВ.

Расчеты, выполненные по аналогии с рис. 7а для другого сопротивления заземления опоры (рис. 9) и для другого класса напряжения (рис. 10), позволяют отследить, как варьируется размер области негативного влияния подвесного ОПН при разряде молнии в его опору ВЛ. Видно, что размер этой области возрастает:

- по мере снижения сопротивления заземления;
- по мере роста класса напряжения.

Таким образом, можно предполагать, что при импульсных сопротивлениях заземления 10–50 Ом размещение подвешенного ОПН на подходе ВЛ к РУ:

- допустимо для ВЛ 35–110 кВ;
- не рекомендуется для ВЛ 220–750 кВ (лучше заменить подвешенной ОПН обычным, установленным на земле в РУ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. ОПН, установленные на подходах к РУ, совместно с ОПН, размещенными у силовых трансформаторов, образуют так называемую каскадную схему, эффективно защищающую изоляцию оборудования РУ от грозовых перенапряжений.
2. Эффективность каскадной схемы защиты во многом зависит от того, как установлены ОПН на подходах к РУ: размещены на земле и присоединены к контуру заземления РУ или закреплены на входной опоре ВЛ и заземлены на ее тело.
3. При установке ОПН на опоре ВЛ эффективность каскадной схемы меньше, чем при размещении ОПН на земле, так как:
 - у подвешенного ОПН больше индуктивность в цепи протекания тока;
 - у подвешенного ОПН при разрядах молнии в опору может происходить занос высокого потенциала с тела опоры через ОПН в фазный провод и далее на оборудование РУ.
4. Для организации каскадной схемы защиты оборудования от перенапряжений на подходах к РУ можно и нужно устанавливать ОПН. При этом предпочтение надо отдавать ОПН, размещаемым на земле.
5. При отсутствии места на земле возможно размещение ОПН на опоре ВЛ, но только при наличии расчетов, которые позволят оценить негативный эффект заноса потенциала при разрядах молнии в опору с ОПН на фоне положительной роли такого ОПН при разрядах молнии в другие места подхода.
6. Без расчетов, экспертно можно предположить, что негативного эффекта от подвешенных ОПН на подходе к РУ следует ждать не для классов напряжения 35–110 кВ, а для 220–750 кВ. Именно для РУ 220–750 кВ на подходе важно устанавливать не подвешенные ОПН, а ОПН обычного исполнения на земле.
7. Вопреки мнению авторов [1], которые применили метод кривой опасных токов, статистические расчеты в ЕМТР показали, что установка на подходе ВЛ к РУ 110 кВ подвешенного ОПН не снижает, а повышает грозоупорность РУ, хотя и не так сильно, как повышает грозоупорность ОПН обычного исполнения, размещенный на подходе ВЛ на земле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гумерова Н.И., Косоруков А.В., Ефимов Б.В. Защищенные подходы к РУ. Требования по защите от грозовых воздействий // *Новости ЭлектроТехники*. 2014. № 2(86). С. 52–56.
2. Дмитриев М.В. ПУЭ и защита от грозовых перенапряжений // *Новости ЭлектроТехники*. 2007. № 3(45), № 4(46).
3. Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. Л.: Наука, 1981.
4. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35–750 кВ и защита от них. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.
5. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6–750 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

КОММЕНТАРИЙ

НЕОБХОДИМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕГЛАМЕНТ

Алексей Панов,
заместитель генерального
директора ЗАО «Полимер-Аппарат»,
г. Санкт-Петербург

Авторы статей «Защищенные подходы к РУ» и «Установка ОПН на подходах ВЛ к распределительным устройствам», опубликованных в прошлом и нынешнем номерах журнала «Новости ЭлектроТехники», расчетными методами наглядно показывают, что неправильное применение ограничителей перенапряжений может не только не улучшить ситуацию, но даже стать причиной повреждения оборудования. Актуальность данных расчетов не вызывает сомнений, так как в настоящее время с помощью ОПН решаются самые различные задачи, но при этом эффекты, описанные в материалах, не учитываются. Но если Н.И. Гумерова и соавторы просто не рекомендуют установку ОПН на подходах ВЛ к подстанции, то М.В. Дмитриев показал, как именно должна быть реализована схема молниезащиты, чтобы быть эффективной.

Выводы М.В. Дмитриева подтверждаются тем фактом, что «Полимер-Аппарат» успешно реализовал множество проектов по молниезащите подходов к подстанциям с применением ОПН и отказом от грозозащитного троса. Эффект переноса потенциала на фазные провода, описанный в обеих статьях, учитывался при выборе места и параметров ОПН, устанавливаемых на подстанции.

Нам как производителям ОПН кажется, что следующим шагом должно быть если не внесение изменений в раздел 4.2 ПУЭ 7-го изд., то хотя бы создание отдельного документа, который регламентирует не только места установки и длину защищенных подходов, но и параметры защитных аппаратов – ОПН. Если ПУЭ 7-го изд. ориентированы на 3–4 типа разрядников для каждого класса напряжения, почему бы не нормировать такое же количество типов ОПН? При этом обязательно должны рассматриваться действительно типовые ОПН, удовлетворяющие как техническим, так и экономическим требованиям. Документ также должен содержать и рекомендации по защите подстанционного оборудования при выполнении молниезащиты подходов воздушных линий с помощью ОПН.

Если авторы статей совместно создадут такой документ, то это позволит проектным организациям выбирать места установки ограничителей перенапряжений, пользуясь логикой ПУЭ 7-го изд. для вентильных разрядников и учитывая особенности современных защитных аппаратов. Кроме того, будут стандартизированы и типы ОПН, что удобно и проектировщикам, и эксплуатирующим организациям, и производителям оборудования.