

УДК 621.316

С.Ю.ШЕВЧЕНКО (канд. техн. наук, проф.), **О.Н.ДОВГАЛЮК** (канд. техн. наук, доц.),
А.Е.ПИРОТТИ (канд. техн. наук, доц.)

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
dovgaljuk@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИИ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В существующей на сегодняшний день нормативной документации отсутствуют методики, позволяющие обоснованно выбрать основные характеристики защитных аппаратов. Поэтому часто выбирают ОПН с необоснованно завышенными током пропускной способности и удельной поглощаемой энергией. Правильный выбор характеристик ОПН в сочетании с обобщенным анализом статистических данных, полученных в процессе эксплуатации ОПН, является очень важной задачей защиты оборудования подстанций от перенапряжений.

Ключевые слова: *ограничитель перенапряжения, подстанция, оборудование, остающееся напряжение, варистор, пропускная способность, поглощаемая энергия, классификационный ток, классификационное напряжение, длина пути утечки, перенапряжение.*

Постановка проблемы. Проблема надежной защиты оборудования подстанций (ПС) от перенапряжений является одной из наиболее актуальных для энергетики. В то же время многие вопросы, возникающие при выборе и эксплуатации защитных аппаратов, не находят достаточного отражения в нормативных документах. Необоснованный подход к решению этого вопроса приводит не только к снижению надежности работы потребителей, но и к значительным ущербам вследствие выхода из строя дорогостоящего оборудования. Таким образом, анализ требований к выбору и эксплуатации защитных аппаратов, особенностей их функционирования при защите оборудования подстанции от перенапряжений является очень важной задачей, имеющей практический интерес.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Исследованиям проблем в области защиты оборудования подстанции от перенапряжений уделяется много внимания, поскольку решение этих вопросов неразрывно связано с развитием научных подходов и технических устройств, предлагаемых различными производителями [1-6]. Тем не менее, до сих пор нет единого подхода к решению проблемы выбора типа защитных аппаратов и методик по согласованию их характеристик для обеспечения надежной защиты оборудования подстанции от перенапряжений.

Целью статьи является анализ особенностей защиты оборудования электрических подстанций от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Изложение основного материала. Часто причиной выхода из строя подстанционного оборудования является наличие в сети импульсов перенапряжений, вызываемых различными источниками. В случае возможности превышения какого-либо из воздействий на оборудование допустимой величины (с учетом длительности воздействия) необходимо принятие мер по ограничению таких воздействий до величин, безопасных для оборудования.

При защите ПС от перенапряжений одной из требующих решения задач является обеспечение надежности самих защитных аппаратов.

Основными характеристиками ОПН являются [7]: класс напряжения сети, наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН, номинальное напряжение, характеристика «напряжение-время», номинальный разрядный ток, пропускная способность, удельная поглощаемая энергия, остающееся напряжение, классификационный ток, классификационное напряжение, длина пути утечки.

Превышение значений какого-либо из этих воздействий может стать причиной повреждения аппарата. Даже в случае, если защитный аппарат и не выйдет из строя непосредственно после такого воздействия, его ресурс будет снижен относительно расчетного и соответственно срок службы сократится.

Кажущаяся простота конструкции часто приводит к тому, что при установке ОПН не проводят проверку допустимости использования устанавливаемого ОПН в рассматриваемой точке сети.

Как показывает опыт эксплуатации нелинейных ограничителей [1] в электрических сетях номинальным напряжением 110–750 кВ, наиболее тяжелыми являются условия работы ОПН при квазистационарных повышениях напряжения. Длительность и значения повышений напряжения в этих режимах определяются видом коммутации, а ограничение времени существования таких режимов должно осуществляться выбором коммутируемых схем и временем действия соответствующей релейной защиты или противоаварийной автоматики. При выборе характеристик ОПН для конкретных условий эксплуатации должны быть рассмотрены необходимость и возможность проведения в сети специальных схемно-режимных мероприятий, ограничивающих до допустимых значений воздействие на ОПН квазистационарных перенапряжений [2,3].

Выбор основных характеристик должен проводиться с учетом воздействий, которым подвергаются эти защитные аппараты в эксплуатации. В существующей нормативной документации отсутствуют методики,

позволяющие обоснованно выбрать основные характеристики ОПН. Зачастую из-за этого выбирают ОПН с необоснованно завышенными током пропускной способности и удельной поглощаемой энергией. В результате выбранные с «хорошим» запасом ОПН (в основном по току пропускной способности) подвергаются заметно меньшим допустимым воздействиям. Естественно, что рост энергоемкости ОПН приводит к существенному удорожанию аппарата (приблизительно на 25% при переходе к каждому следующему классу разряда линии) [4].

ОПН представляет собой аппарат, достоверную причину повреждения которого зачастую нельзя указать. К числу таких причин относятся:

- неверный выбор ОПН (по вине проектировщиков или ответственных лиц, представивших неверную или неполную исходную информацию);
- ненадлежащие условия эксплуатации (например, повышенный сверх допустимого для ОПН уровень напряжения в месте установки аппарата);
- качество изготовления самого ОПН (по вине производителя).

Кроме того, нелишне упомянуть электрическую прочность внешней изоляции (корпуса) ограничителя с учетом ее загрязнения и увлажнения.

Разработка методик выбора характеристик ОПН для конкретных условий эксплуатации сдерживается отсутствием достоверных сведений о располагаемом рабочем ресурсе варисторов, и в том числе численных соотношений между влияющими факторами и ресурсом. Такие сведения могут быть получены либо при проведении соответствующих испытаний варисторов ОПН, либо на основе анализа и обобщения опыта их эксплуатации.

Одним из способов сбора информации о состоянии ОПН является использование совместно с ними счетчиков числа срабатываний, однако они также не могут предоставить полную картину фактического состояния ОПН.

Это связано с тем, что даже у счетчиков, оснащенных простыми миллиамперметрами, крайне ограничена область применения, поскольку они не различают токи утечки по внешней и внутренней изоляции, а также эффекты влияния гармоник.

Защитные аппараты на ПС могут быть установлены в таких местах: в цепи трансформатора, автотрансформатора; у шунтирующего реактора; на шинах распределительного устройства ПС (например, у шинных измерительных трансформаторов напряжения); на концах присоединенных к ПС линий.

Правильный выбор места установки ОПН дает возможность использовать в полном объеме следующие его характеристики: необслуживаемость на протяжении всего срока службы; неограниченный коммутационный ресурс; широкий номенклатурный ряд рабочих напряжений; стабильность нестареющих характеристик; взрывобезопасность и сейсмостойкость; стойкость к атмосферным загрязнениям; удобство встраивания в распредустройства; малые вес и габариты.

ОПН, являясь средством ограничения перенапряжений на изоляции электрооборудования подстанций, линий и электрических машин, повышения надежности работы защищаемого объекта, не должен снижать надежности за счет собственного повреждения. Поэтому выбор этих защитных аппаратов, как и выбор любого электрического оборудования, должен быть тщательно взвешен и обоснован.

Первым, и наиболее важным, шагом для ограничителей является выбор напряжения ОПН с учетом времени его воздействия. Для этого необходимо иметь максимальную информацию о сети (об объекте), где будет работать защитный аппарат.

Главным обстоятельством, определяющим безаварийную работу ограничителей, является длительное допустимое рабочее напряжение на аппарате.

Поскольку воздушные и кабельные линии в сетях до 35 кВ включительно имеют незначительную протяженность, то для ОПН для установки на линиях длительное допустимое рабочее напряжение может быть принято таким же, что и для ОПН, устанавливаемых на подстанциях.

Кроме того, условия работы ОПН, оказываются разными для различных сетей: генераторного напряжения; собственных нужд электростанций; распределительных сетей, работающих в режиме изолирования нейтрали или ее резонансного заземления через дугогасящий реактор.

При предварительном выборе величины напряжений при частоте 50 Гц, длительно воздействующих на ОПН, следует иметь в виду, что в сетях до 35 кВ включительно с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью при замыканиях на землю одной из фаз на двух здоровых фазах устанавливается линейное напряжение $\sqrt{3}U_{\phi м}$, где $U_{\phi м}$ – максимальное фазное напряжение [8].

При выборе ОПН для установки в нейтрали трансформаторов для защиты дугогасящих реакторов и вращающихся электрических машин в первом приближении можно считать, что на ОПН нейтрали действительно может воздействовать напряжение частотой 50 Гц не более $U_{\phi м} = \frac{U_{нр}}{\sqrt{3}}$

Варистор или ОПН, рассчитанный на определенное длительное напряжение $U_{нр}$, пропускает через себя определенный активный ток, который не нарушает его тепловой баланс (тепловую устойчивость). Это позволяет за счет сокращения длительности воздействия увеличить величину допустимого напряжения.

Одним из основных параметров, определяющих электрические характеристики нелинейных ОПН, является величина импульсного (разрядного) тока I_p , допустимого через варисторы упомянутых защитных аппаратов. При значениях тока больше допустимого I_p для выбранных варисторов может произойти их перекрытие по боковой поверхности.

Величина импульсного тока через ОПН зависит от типа открытого распределительного устройства подстанции (тупиковая, проходная, узловая), числа и количества защитных аппаратов, типа и характеристик самих защитных аппаратов, типа защищаемого оборудования, конденсаторных батарей, силовых фильтров, расстояния между защищаемым оборудованием и защищаемым аппаратом, местом установки ОПН (на подстанции, в линии и др.).

Форма импульсных перенапряжений через ОПН на подстанциях определяется крутизной приходящих импульсов напряжения, входной емкостью электрооборудования, числом и характеристиками защитных аппаратов, расстояниями между защитными аппаратами и защищаемых электрооборудованием. Длина фронта таких импульсов изменяется в широких пределах от 4 до 12 мкс, длина полуспада – от 15 до 40 мкс. При выборе ОПН ориентируются на волну 8/20 мкс.

Если на подстанции установлены конденсаторные батареи поперечной компенсации, а на подходах линий к подстанциям – конденсаторы связи, упомянутые волны могут несколько «растягиваться» и нести большую энергию на 1 кВ $U_{нр}$.

Коммутационные токи [9] также являются одним из основных факторов, определяющих сечение варисторов и вольтамперную характеристику всего защитного аппарата.

Ток I_k через ОПН, установленный в конце линии, может быть определен по упрощенной формуле

$$I_k = \frac{(U_{\max} - U_{осм})}{Z_в}, \quad (1)$$

если защитный аппарат установлен на питающем конце линии (на шинах питающей подстанции), то

$$I_k = \frac{(U_{\max} - U_{осм})}{Z_в} \cdot \left(1 + \frac{Z_в}{\beta L_n}\right), \quad (2)$$

где U_{\max} – амплитуда неограниченных перенапряжений; $U_{осм}$ – остающееся напряжение на варисторах ОПН при токе I_k ; $Z_в$ – волновое сопротивление провода относительно земли; L_n – предвключенная индуктивность питающей подстанции; $\beta = \frac{(\beta_1 + \omega)}{2}$ – расчетная частота; β_1 – наименьшая из частот свободных колебаний системы; ω – частота вынужденной ЭДС.

Поскольку ток I_k , в свою очередь, зависит от $U_{осм}$, его значение определяется параметрами точки пересечения ВАХ ограничителя и нагрузочной кривой.

Для устойчивой работы ОПН важно знать значение удельной энергоемкости (в кДж на 1 кВ $U_{ном}$, $U_{нр}$ или $U_{рнр}$). В ряде случаев используют также общую энергоемкость ограничителей.

При установке ОПН на конденсаторных батареях поперечной компенсации или на кабельных присоединениях энергия, погашаемая ОПН, может быть определена по формуле

$$W = \frac{1}{C} \left[(3U_{нр})^2 - (\sqrt{2} \cdot 1,25U_{рнр})^2 \right], \quad (3)$$

где C – емкость батареи или кабеля, Ф; $U_{нр}$ – амплитуда наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения фаза-земля, кВ.

В других случаях энергия может быть определена как

$$W = \frac{U_{\max} - U_{осм}}{Z_в} U_{осм} \cdot 2Tn, \quad (4)$$

где T – время распространения волны, мкс; $T = \frac{L}{V}$, где L – длина линии; V – скорость распространения волны; n – количество последовательных импульсов.

При выборе ограничителей их характеристики должны быть согласованы с характеристиками изоляции защищаемого оборудования. Выбор и размещение ОПН в сетях по грозозащите определяется заданным показателем надежности грозозащиты подстанции.

При определении расстояния между ОПН и защищаемой изоляцией необходимо удовлетворить одно из двух условий:

- 1) амплитуда импульсных перенапряжений обычно на 20÷40% выше, чем остающееся напряжение ОПН;
- 2) величина перенапряжений должна быть на 15÷20% ниже испытательного напряжения.

Выбранный ОПН проверяется на обеспечение им требуемого защитного уровня коммутационных перенапряжений. Для ОПН обычно нормируются значения тока срабатывания противозрывного устройства, при которых не происходит взрывного разрушения покрышки ОПН при его внутреннем повреждении.

При выборе ограничителей необходимо иметь в виду, что при токах срабатывания взрывного устройства до 40 кА, его значение должно быть на 15÷20% больше тока однофазного или трехфазного тока короткого

замыкания. Для ОПН с токами срабатывания противозрывного устройства свыше 40 кА введение коэффициента запаса не требуется.

При работе ОПН в различных районах по загрязнению важное значение имеет правильный выбор длины пути утечки внешней изоляции. При этом удельная длина пути утечки для ОПН должна выбираться не менее, чем на 20 % выше, чем для остального оборудования подстанции.

Не менее важное значение имеет обоснованный выбор ОПН по механическим характеристикам.

Окончательный выбор ограничителей производится с учетом всех электрических и неэлектрических воздействий. При этом необходимо особое внимание обратить на возможные квазистационарные перенапряжения, если на линиях установлены силовые трансформаторы или шунтирующие реакторы.

При окончательном выборе ограничителей перенапряжения следует особое внимание уделить расстояниям между ОПН и защищаемой изоляцией. При вновь строящихся объектах это расстояние определяется расчетным путем. При замене вентильных разрядников на ОПН, расстояние от ОПН до защищаемой изоляционной конструкции может быть определено по формуле

$$L = \frac{L_{PB}(U_{исп} - U_{ОПН})}{U_{исп} - U_{PB}}, \quad (5)$$

где $U_{исп}$ – испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе; L_{PB} – расстояние от защищаемого оборудования до РВ, нормируемое ПУЭ; $U_{ОПН}$ – остающееся напряжение на ОПН при разрядном токе 10 кА; U_{PB} – то же на вентильном разряднике при разрядном токе 10 кА.

Также следует отметить, что при протекании через ограничитель импульсных токов [10] при падении на подстанции грозových волн на заземляющем устройстве (ЗУ) подстанции в месте его присоединения возникает напряжение $U_{ЗУ} = I_p R_{ЗУ}$, где I_p – разрядный ток ограничителя, $R_{ЗУ}$ – импульсное сопротивление заземления ЗУ. Перенапряжения на вторичных обмотках измерительных трансформаторов может быть приблизительно в два раза выше $U_{ЗУ}$ в месте присоединения их к ЗУ, поэтому точка присоединения ОПН должна быть как можно дальше удалена от точек заземления названных трансформаторов.

Выводы. На основании проведенного анализа особенностей защиты оборудования подстанции от перенапряжений можно сделать следующие выводы:

– должна быть проверена соответствующими расчетами достаточность характеристик ОПН для удовлетворения условиям эксплуатации на каждой конкретной ПС;

– при выборе характеристик ограничителей перенапряжений для конкретных условий эксплуатации должны быть рассмотрены необходимость и возможность проведения в сети специальных схемно-режимных мероприятий, ограничивающих до допустимых значений воздействие на ОПН квазистационарных перенапряжений;

– необходимо проводить статистический анализ и обобщение опыта эксплуатации ОПН на основе использования датчиков количества срабатываний ОПН при защите оборудования;

– при правильном выборе ОПН позволит снизить воздействия коммутационных и грозовых перенапряжений на оборудование ПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иманов Г.М. Анализ опыта эксплуатации ограничителей перенапряжений 110 кВ и выше в сетях РАО «ЕЭС России» / Г.М. Иманов, А.И. Таджибаев, Ф.Х. Халилов // Промышленная энергетика. – 1998. – № 1.
2. Александров Г.Н. Применение управляемых шунтирующих реакторов и нелинейных ограничителей перенапряжений в электрических сетях высокого напряжения / Г.Н. Александров, А.И. Афанасьев. - СПб.: ПЭИПК, 1999.
3. Проблемы применения нелинейных ограничителей перенапряжений 110–750 кВ / [Ю.И. Лысков, Н.П. Антонова, В.М. Максимов, О.Ю. Демина] // Электрические станции. – 1998. – № 9.
4. Дмитриев В.Л. Защита оборудования подстанций 110-750 кВ от перенапряжений с помощью вентильных разрядников и ограничителей перенапряжений / В.Л. Дмитриев, М.В. Дмитриев // «Новости электротехники». – 2004. – №6(30).
5. Александров Г.Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях / Г.Н. Александров. – СПб.: СЗФ АО «ТВЦ Энергетики», 2003.
6. Веприк Ю.Н. Математическое моделирование режимов работы электросетей с ОПН / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/8. – С. 25-29.
7. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6–750 кВ :Методическое и справочное пособие / [М.А. Аронов, О.А. Аношин, О.И. Кондратов, Т.В. Лопухова]; под ред. М.А. Аронова. - М.: Изд-во «Знак», 2001.
8. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / под научной редакцией Н.Н. Тиходева. – СПб.: Изд. ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
9. Халилов Ф.Х. Выбор нелинейных ограничителей перенапряжения для установки в сетях 110-750 кВ / Ф.Х. Халилов. – СПб, 2005.
10. Техника высоких напряжений / под редакцией Г.С. Кучинского. - М.: Энергоатомиздат, ЛО, 2003.

REFERENCES

1. Aronov M.A., Anoshin O.A., Kondratov O.I., Lopuhova T.V. Surge arresters in electrical 6-750 kV/ Metodicheskoe I spravochnoe posobie pod red. M.A. Aronova. M.:Izd-vo "Znak", 2001.
2. Imanov G.M., Tadgibaev A.I., Halilov F.H. Analysis of operating experience surge arresters 110 kV and above in the networks of RAO "UES of Russia"// Promishlennaya energetika. 1998; № 1.
3. Aleksandrov G.N., Afanas'ev A.I. The use of controlled shunt reactor and nonlinear surge arresters in networks of high voltage. – SPb.: PEIPK. 1999.
4. Liskov Y.I. Problems of Nonlinear 110-750 kV surge arresters/ Y.I.Liskov, N.P.Antonova, V.M.Maksimov, O.Y.Demina//Elektricheskie stancii. 1998; № 9.
5. Aleksandrov G.N. Overvoltage limitation in electrical networks / G.N.Aleksandrov. – St. Petersburg: SZF AO "GVC Energetiki", 2003.
6. Veprik Y.N. Mathematical modeling of electric modes with surge arresters / Y.N.Veprik, S.N.Lebedka // East European Journal of advanced technology. 2012; № 3/8: 25-29.
7. Guidelines on the Protection of electrical networks 6-1150 kV Lightning and internal overvoltages/ Pod nauchnoi redakciey N.N.Tihodeeva, 2-oe izdanie. St. Petersburg Izd. PEIPK Mintopenergo RF, 1999.
8. Halilov F.H. The choice of non-linear surge be installed in 110-750 kV. St. Petersburg, 2005.
9. Technics of high pressure. Pod redakciey G.C.Kuchinskogo, Energoatomizdat, LO, 2003.
10. Dmitriev V.L., Dmitriev M.V. Protection of 110-750 kV substation equipment with surge valve arresters and varistors. "Novosti elektrotehniki". 2004; №6(30).

Надійшла до редакції 13.02.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

С.Ю.ШЕВЧЕНКО, О.М.ДОВГАЛЮК, О.Є.ПІРОТТИ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Особенности защиты оборудования подстанции від перенапруг. У нормативній документації, що існує на сьогоднішній день, відсутні методики, які дозволяють обґрунтовано обрати основні характеристики захисних апаратів. Тому часто вибирають ОПН з необґрунтовано завищеними струмом пропускної здатності й питомою поглинальною енергією. Правильний вибір характеристик ОПН у поєднанні з узагальненим аналізом статистичних даних, зібраних в процесі експлуатації ОПН є дуже важливою задачею захисту обладнання підстанцій від перенапруг.

Ключові слова: обмежувач перенапруги, підстанція, обладнання, залишкова напруга, варистор, пропускна здатність, поглинута енергія, класифікаційний струм, класифікаційне напруга, довжина шляху витоку, перенапруження.

S. SHEVCHENKO, O. DOVGALYUK, A. PIROTTI

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Peculiarities of Overvoltage Protection of Substation Equipment. Often the cause of failure of substation equipment is the availability of the network surges caused by different sources. It is necessary to take measures to limit these impacts to the values that are safe for the equipment. In the protection of the substation surge one of the tasks to be solved is to ensure the reliability of the protective devices themselves. The main characteristics of the surge arrester are the class of the supply voltage, the greatest long-term operating voltage arrester rated voltage characteristic of "tension-time", the nominal discharge current, capacity, specific energy absorbed, the remaining voltage, current classification, the classification voltage creepage distance. The excess value of any of these effects can cause damage to the unit. Even if the protective device does not fail immediately after such exposure, its life will be reduced with respect to the design and thus the service life will be reduced. Thus, the correct choice of the characteristics of the surge arresters, combined with a generalized analysis of the statistical data collected during operation of surge arresters is the major task of protection of substation equipment from surges.

Key words: surge arrester, substation, equipment, residual voltage, varistor, carrying capacity, absorbed energy, classification current, classification voltage, creepage distance, overvoltage.