

НАУКА – НАУКОВО-ТЕХНІЧНОМУ ПРОГРЕСУ В ГІДРОЕНЕРГЕТИЦІ



УДК 621.311

КИРИК В.В., докт. техн. наук, ст. научный сотрудник,
САМКОВ А.В., докт. техн. наук, зам. директора,
Ин-т электродинамики НАН Украины, г. Киев
ГУБАТЮК О.С., аспирант, НТУУ "КПИ", г. Киев,

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ



КИРИК В.В.



САМКОВ А.В.



ГУБАТЮК О.С.

Проведен анализ методов защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений линий электропередач. Рассмотрены основные недостатки существующих методов защит и возможности их устранения, а также способы защиты от перенапряжений в высоковольтных электрических сетях. Обосновано использование ограничителей перенапряжения для защиты изоляции оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений. Представлен обобщенный анализ опытно-промышленной эксплуатации гирлянд мультикамерных изоляторов-разрядников и системы мониторинга.

Введение. Работа электрической системы в целом определяется надежностью ее составляющих. Отключения линий электропередачи (ЛЭП) приводят к перебоям в электроснабжении и, как следствие, к экономическому ущербу для потребителей. Из-за перенапряжений, вызванных грозовыми и коммутационными воздействиями на ЛЭП, изоляция электрооборудования либо повреждается сразу, либо стареет вследствие кумулятивного эффекта и раньше гарантированного срока эксплуатации выходит из строя. В результате отключения ЛЭП из-за перенапряжений необходимо проводить дорогостоящие работы по восстановлению изоляционных конструкций и других элементов системы электроснабжения, что приводит к серьезным финансовым потерям.

При обработке статистических данных по устойчивым отключениям воздушных линий (ВЛ) напряжением 35...750 кВ в электроэнергетической системе РФ установлено, что вызванные климатическими воздействиями потери работоспособности таких ВЛ составляют 38 %, а дефекты эксплуатации – 9 % [7].

Согласно информационному сообщению НЕК "Укрэнерго" статистика по общему количеству автоматических отключений ВЛ имеет вид представленный на Рис. 1. Среднестатистическое количество отключений ВЛ напряжением 220...750 кВ в объединенной энергосистеме Украины за период от 2001 по 2010 год составляет 75 отключений в год. Количество автоматических отключений ВЛ, вызванных климатическими воздействиями (сильный ветер, гололед, пляска, грозовые воздействия) составляют 52 % от общего числа, из которых около 41% по причине грозовых перенапряжений. Поскольку число поражений молнией линии электропередач $N = 0,4n h L \cdot 10^{-3}$ зависит от числа часов грозовой активности в год n , средней высоты подвески провода h и длины линии L , то увеличение числа грозовой активности является одним

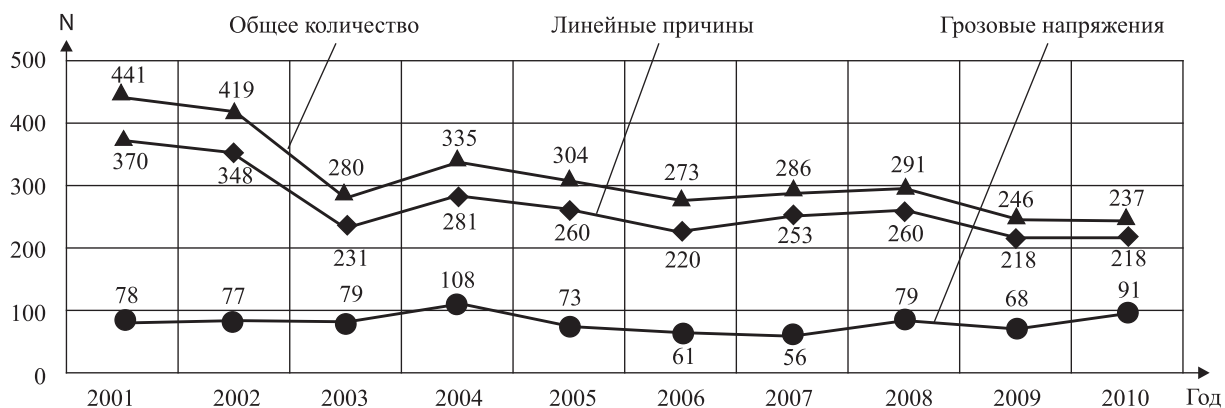


Рис. 1. Количество автоматических отключений ВЛ 220-750 кВ по годам



из факторов увеличения количества отключений ВЛ. По данным Украинского гидрометеоцентра в 2010 году продолжительность грозовой активности на территории Украины составила 70 часов против 49 часов в 2009 году (увеличение на 43 %). При этом в 2010 году увеличение числа отключений по причине грозowych перенапряжений по сравнению с предыдущим годом составило 34 %.

Согласно данным компании по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей "ОРГРЭС" России, только за период с 1997 по 2001 гг. в результате атмосферных воздействий были повреждены 68 силовых и 124 измерительных трансформаторов.

Вследствие использования новых информационно-технологических процессов, усложнения промышленного и бытового электрооборудования современного социума, а также ужесточения требований к непрерывности электроснабжения задачи повышения надежности работы высоковольтных ВЛ, уменьшения числа и длительности их аварийных отключений приобретают особую актуальность.

Постановка задачи. Анализ перенапряжений в линиях электропередачи, а также адекватных мер и средств их устранения требует разработки новых подходов к расчету количества и мест установки защитного оборудования вдоль трассы ВЛ с учетом рельефа местности, наличия водоемов и геоэлектрической неоднородности грунтов.

Классификация перенапряжений электрических систем. Перенапряжения электрических систем имеют весьма опасные последствия. Вызвав пробой изоляции, они провоцируют короткие замыкания (КЗ), пожары в электроустановках, и, как следствие, опасны для жизни людей и приводят к аварийным отключениям электрооборудования потребителей.

Перенапряжения возникают по следующим причинам: внешним (атмосферным) и внутренним (перенапряжения при резонансных явлениях, авариях и коммутациях элементов электрической сети). Основной причиной внешних перенапряжений, источник энергии которых находится вне сети, является воздействие молнии при грозе. Внутренние перенапряжения обусловлены кратковременным изменением режима или конфигурации схемы электропередачи и связаны с перераспределением энергии, запасенной в электростатическом и электромагнитном полях элементов системы.

В высоковольтных линиях главным источником внешних перенапряжений являются разряды молнии. Наиболее опасны прямые удары молнии (ПУМ) в оборудование, при которых даже на за-

земленных установках возникают большие потенциалы.

Внутренние перенапряжения по длительности и по причине возникновения делятся на квазистационарные и коммутационные. Квазистационарные перенапряжения обычно представляют собой длительные (от единиц секунд до нескольких минут) повышения напряжения: режимные, резонансные, феррорезонансные и параметрические.

Коммутационные перенапряжения возникают при переходных процессах и быстрых изменениях режима работы системы за счет энергии, запасенной в емкостных и индуктивных элементах. Коммутационные перенапряжения сопутствуют различным переключениям в системе (включение или отключение: ЛЭП, трансформаторов, реакторов при возникновении и ликвидации коротких замыканий). Коммутационные перенапряжения по видам коммутаций могут быть: фазные, воздействующие на изоляцию токоведущих частей по отношению к земле; межфазные, воздействующие на изоляцию между токоведущими частями различных фаз; межконтактные, возникающие между разомкнутыми контактами коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей).

Анализ систем защиты линий электропередач от перенапряжений. Для стандартных электрических схем основным регламентирующим документом по защите от перенапряжений является "Правила устройства электроустановок" (ПУЭ). Исходя из их требований определяются места установки защитных средств. При нестандартных схемах электроснабжения необходимо выполнять расчеты для определения мероприятий и средств защиты от перенапряжений, а также места их установки.

Все мероприятия по защите от перенапряжений можно разделить на две группы: превентивные меры снижения перенапряжений и защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств.

Превентивные меры позволяют предотвратить возникновение перенапряжений или ограничить их величину. При этом применяются выключатели с шунтирующими резисторами; выключатели без повторных зажиганий дуги между контактами при их разведении; грозозащитные тросы и молниеотводы; заземление опор ЛЭП; емкостная защита изоляции обмоток трансформаторов и реакторов; емкостные элементы для снижения перенапряжений.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений срабатывают и соединяют защищаемую цепь с заземлением в случае, когда перенапряжение в точке их установки превышает неко-



торую критическую величину. Такими средствами и являются разрядники, шунтирующие реакторы с искровым соединением и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Разряд молнии является неизбежным природным фактором грозы. Здесь необходимо отметить, что сегодня существующие карты районирования грозовой деятельности по территории Украины не дают достоверной информации о происходящих климатических изменениях на ней и что является существенным фактором при выборе технических средств защиты от грозовых перенапряжений. Важность этого подтверждается тем, что в настоящее время в России, по примеру других индустриально-развитых стран, создается система пеленгации разрядов молний, подобно системе, создаваемой в США, для определения зон наиболее вероятного поражения объектов электроэнергетических систем. Смысл определения координат молнии имеет место при создании и постоянной корректировке геоинформационной карты электроэнергетической системы. В России начаты работы по созданию такой системы, в которой каждая опора ЛЭП будет привязана к местности и иметь свои координаты. Такой подход открывает возможность наличия реальной статистики поражений молнией объектов электроэнергетических систем и более оптимального применения средств защиты от перенапряжений.

Защита от грозовых импульсных перенапряжений, как правило, выполняется разрядником, варистором, разделительным трансформатором. Разрядник представляет собой устройство из двух токопроводящих пластин с калиброванным зазором. При существенном повышении напряжения между пластинами возникает дуговой разряд, обеспечивающий сброс высоковольтного импульса на землю. По исполнению разрядники бывают следующими: воздушные, воздушные многоэлектродные и газовые. В газовом разряднике дуговая камера заполнена инертным газом низкого давления. Благодаря этому их параметры мало зависят от внешних условий (влажность, температура, запыленность и т. д.), кроме этого газовые разрядники имеют относительно высокое сопротивление. Варистор представляет собой керамический элемент, у которого резко падает сопротивление при превышении определенного напряжения. Разделительный трансформатор — это силовой 50-герцовый трансформатор с отдельными обмотками и равными входным и выходным напряжениями. Трансформатор просто не способен передать столь короткий высоковольтный импульс во вторичную обмотку и благодаря этому свойству в некоторой степени является идеальной защитой от импульсных перенапряжений.

Безусловно, приведенные защитные устройства, имеют свои достоинства и недостатки. При сравнении разрядника и варистора с одинаковыми максимальными импульсными токами, не трудно определить, что разрядник способен поглотить энергию на два порядка больше, чем варистор. Однако варистор срабатывает быстрее при значительно более низком напряжении и имеет более низкую генерацию высокочастотных помех. Разделительный трансформатор, при определенных условиях имеет достаточно высокий ресурс по защите нагрузки от импульсных перенапряжений, а у варисторов и разрядников при срабатывании происходит постепенное разрушение материала их элементов.

Основными аппаратами, защищающими от перенапряжений длительное время являлись вентильные разрядники, которые в настоящее время морально и конструктивно устарели.

Согласно Руководству по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений [1] в качестве основных средств рекомендуется использовать следующее: заземленные тросы; снижение сопротивления заземления опор; повышение импульсной прочности линейной изоляции; защиту отдельных участков и опор с ослабленной изоляцией; ограничители перенапряжений. Резервным средством защиты электрооборудования от перенапряжений с целью повышения надежности и бесперебойности работы ЛЭП является использование средств автоматики: автоматическое повторное включение (АПВ), в особенности быстродействующие (БАПВ) и однофазные (ОАПВ).

Подвеска заземляющих тросов позволяет уменьшить в сотни раз количество ударов молнии непосредственно в провода, поражение которых представляет наибольшую опасность для изоляции ВЛ. Для снижения потерь электроэнергии от индуктированных токов в тросах, а также для использования тросов в качестве канала связи или в целях емкостного отбора мощности, грозозащитный трос крепится к опоре на изоляторах, снабженных шунтирующими искровыми промежутками. При разряде молнии искровые промежутки пробиваются уже во время развития лидера разряда, и в стадии главного разряда трос работает как заземленный наглухо.

Однако в ряде случаев традиционные мероприятия не дают приемлемой величины допустимого количества грозовых отключений (при заданной грозовой интенсивности и длине ВЛ). В таких случаях предпочтение отдается альтернативным способам защиты ВЛ 110 — 220 кВ от попадания молнии. Так рекомендуется сооружение



дополнительного троса не над верхними фазами, а на уровне нижних фаз. Определенные технико-экономические преимущества имеют также длинно-искровые разрядники (ДИР), которые в ряде случаев позволяют отказаться от грозозащитных тросов и обеспечивают требуемую величину показателя надежности такой защиты ВЛ за счет значительного снижения вероятности перехода импульсного перекрытия изоляции в устойчивую дугу тока короткого замыкания. Однако ДИР освоены и широко применяются только в сетях до 35 кВ.

В настоящее время вентильные разрядники практически сняты с производства, а те, которые эксплуатируются, в большинстве случаев отслужили свой нормативный период. Для создания схем защиты изоляции оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений на сегодня наиболее оптимальным является использование ОПН, которые позволяют решить проблему повышения надежности изоляции ЛЭП.

Существующие ОПН представляют собой нелинейные активные сопротивления без специальных искровых промежутков. То есть отличительной особенностью этих аппаратов является отсутствие в них искровых промежутков, предотвращающих протекание значительного тока при рабочем напряжении и обеспечивающих протекание значительного тока при перенапряжениях, как это происходит у разрядников.

Защитные свойства ОПН основаны на нелинейности вольт-амперной характеристики его рабочих элементов, обеспечивающей заметное снижение сопротивления при повышенных напряжениях и возврат в исходное состояние после снижения напряжения до нормального. Достоинствами ОПН по сравнению с вентильными разрядниками являются: их взрывобезопасность; более высокая надежность; снижение уровня перенапряжений, воздействующих на защищаемое оборудование; возможность контроля сопротивления по току в рабочем режиме.

Наибольший эффект улучшения показателя грозоупорности ВЛ обеспечивает установка ОПН на каждой опоре (например, между фазными проводами и опорой, параллельно гирляндам изоляторов) и на всех фазах ВЛ (на трёх фазах одноцепной или на шести фазах двухцепной). Однако, на сегодняшний день из-за достаточно большой стоимости ОПН (например, стоимость ОПН-110 около 8000 грн/шт.) такие защиты ВЛ нецелесообразны с экономической точки зрения.

Классификация мер защиты от коммутационных перенапряжений может быть разделена на аппаратные меры (ОПН, резисторы в выключате-

лях, шунтирующие реакторы) и меры, связанные с управлением коммутаций (управляемое включение и отключение, программированные коммутации).

На сегодня при практически неизменной статистике отключений ЛЭП, как и при прежней статистике тока молнии, изменилось понимание электромагнитных процессов при перенапряжениях. При этом в электрической сети появились новые силовые трансформаторы с измененными входными характеристиками, изменилось видение и подход к определению сопротивления заземления опор при крутых фронтах тока молнии. Освоено производство новых нелинейных ограничителей напряжения, применение которых для защиты от перенапряжений требует новых подходов к определению мест их установки. Так, например, использование ОПН для защиты оборудования ЛЭП, подстанций и, как правило, всех элементов (компонентов) электроэнергетических систем вызывает в некоторых случаях при его срабатывании, особенно при установке на подходах к подстанциям, колебательную составляющую тока с реальной вероятностью возникновения вторичных перенапряжений. Таким образом, возникает задача правильного моделирования и исследования работы ОПН в электрической сети.

Последние 20 лет наряду с подстанционными защитными аппаратами широко применяются подвесные защитные аппараты, предназначенные для защиты сугубо линейной изоляции ВЛ (ОПН-Л). ОПН-Л впервые разработаны и начали широко применяться в Японии и США в 80-х годах для защиты ВЛ на напряжения 66, 77 и 138 кВ.

К 1992 г. в электрических сетях Японии было установлено 29580 аппаратов: 840 – на ВЛ 22–33 кВ (2,84 %), 26495 – на ВЛ 66–77 кВ (89,57 %), 1879 – на ВЛ 110...154 кВ (6,35 %) и 366 – на ВЛ 187...500 кВ (1,24 %) [13]. В Японии ежегодно устанавливается около 7000 штук ОПН-Л. Аналогичное происходит в США и в других странах. В США более половины из 30 энергокомпаний применяют защитные аппараты на линиях 69...230 кВ.

К 1994 г. в Японии ОПН-Л были установлены на 22-х воздушных линиях класса 500 кВ, а на сегодняшний день они уже широко применяются и на линиях 800 кВ. Прежде всего, в Японии ОПН-Л находят для защиты двухцепных ВЛ. Аппараты установлены либо на трех фазах одной цепи (97,07 %), либо на всех шести фазах двух цепей (2,58 %), либо на двух фазах одной цепи (0,35 %), либо на одной из шести фаз (всего два аппарата). Статистический анализ эксплуатации ВЛ, оснащенных подвесными ОПН, пока-



зал весьма ощутимое повышение их надежности. На ВЛ, на которых ОПН установлены на каждой фазе отключений одновременно двух цепей не наблюдалось, а в 60 % происходили лишь отключения одной цепи. На ВЛ, не оснащенных подвесными ОПН в 60 % случаев наблюдались двухцепные отключения, а в остальных случаях – отключения одной цепи. При горизонтальном расположении проводов одноцепных ВЛ, в основном, поражаются крайние фазы. Нижние фазы одноцепных и двухцепных ВЛ с вертикальным расположением фаз практически не поражаются молнией, так как они экранированы верхними проводами. Поэтому с целью уменьшения затрат на защиту линии с помощью ОПН, их установку на нижних фазах можно исключить.

Активное применение ОПН-Л происходит и в других странах. Например, в Бразилии для повышения надежности ВЛ классов напряжений до 230 кВ, где 50...70 % всех повреждений происходят из-за грозových перенапряжений, применяются ОПН-Л. На 2006 г. таких аппаратов было установлено более, чем 2500 штук [14]. Также во Франции, ОПН-Л в обязательном порядке устанавливаются на линиях 63...90 кВ, проходящих вблизи мест пребывания людей (парки, игровые площадки) [12]. При этом, защитные аппараты установлены на каждой опоре.

В объединенной энергосистеме Украины на ВЛ в настоящий момент ОПН для ограничений перенапряжений не используются, предпочтение отдается традиционному средству защиты – грозозащитному тросу.

Чтобы повысить надежность защиты электрических сетей от перенапряжений, сейчас ведутся разработки новых нормативов, методов и средств защиты на основе интеллектуальных технологий принятия решений.

Защита от коммутационных перенапряжений основана на следующих принципах: ограничения числа режимов, в которых могут возникать опасные перенапряжения, с помощью схемных мероприятий; ограничения амплитуд установившихся перенапряжений, что приводит также и к снижению перенапряжений переходного процесса; ограничения амплитуд коммутационных перенапряжений с помощью вентильных разрядников или встроенных в выключатели шунтирующих сопротивлений.

Одним из альтернативных путей повышения надежности защиты на сегодня является разработка лазерного инициирования молнии, которое основано на создании в воздухе ионизированного канала с помощью лазерного излучения. Лазерный канал должен играть роль молниеотвода и

изменять направление развития разряда в сторону от защищаемого объекта. Возможность такого использования лазерной искры доказана прямыми экспериментами на наружном испытательном стенде СПбГПУ [2].

Для разработки мероприятий по повышению грозоупорности ВЛ и оценки эффективности применения новых средств грозозащиты необходима детальная информация о грозовой активности на трассах ВЛ, ударах молнии в линию и аварийных отключениях ВЛ. В настоящее время такая информация ограничивается только констатацией фактов отключения (КЗ на линии) согласно данным работы автоматики. Информация о грозовой обстановке на трассе ВЛ в текущем времени практически отсутствует.

Современный уровень радиотехнических средств пеленгации позволяет своевременно обнаружить местоположение молнии и отследить ее развитие в пространстве и во времени, что даст возможность во многих случаях избежать или существенно снизить ущерб от ее воздействия [4, 11].

В России, чтобы обнаружить опасные гидрометеоявления в атмосфере, широко используются метеорадиолокаторы типа МРЛ-5. При этом грозовые облака распознают по косвенным вероятностным критериям, базирующимся на изменениях ряда параметров радиоэха облаков. Это связано с тем, что метеорадиолокаторы не способны определить молнии, которые и являются основным признаком принадлежности облака к грозовому. Решить такую задачу позволяет сопряжение метеорадиолокаторов с сетью грозопеленгаторов (грозорегистраторов).

Используемые технические средства для определения местоположения разрядов молнии можно разделить на две группы: пеленгационные (DFS) и разностно-дальномерные (ДТОА) системы. В системах DFS месторасположение молнии определяется по пеленгам на электромагнитное излучение во время ее разряда с помощью пространственно разнесенных датчиков. В системах ДТОА местоположение молнии определяется по разностям времени прихода сигнала в разнесенные пункты системы.

Несомненный интерес и перспективу внедрения на территории Украины взамен морально устаревших карт интенсивности грозовой деятельности представляют системы дистанционной пеленгации (СДП) молнии. Данные СДП могут использоваться в энергетике как в режиме аккумуляирования (построения карт плотности разрядов молнии "облако–земля"), так и в режиме реального времени (оперативное обслуживание элект-



рических сетей). Последнее направление актуально, например, с точки зрения выявления мест поражения объектов молнией и, в случае необходимости, скорейшей ликвидации повреждения. Эффективность оперативного использования данных СДП во многом определяется точностными характеристиками при определении места поражения и тока молнии.

В настоящее время одной из проблем при проектировании новых линий электропередачи либо при реконструкции существующих является низкое допустимое механическое напряжение опор ВЛ. То есть при наличии существенного запаса по механической прочности проводов, опоры, спроектированные еще в 60...70 гг., не способны выдержать механические усилия от подвеса проводов, и поэтому, зачастую проектировщикам приходится снижать натяжение проводов и тросов. Тем самым в некоторых случаях приходится увеличивать высоту опоры для создания требуемого габарита по ПУЭ. При этом для создания требуемого расстояния между проводом и тросом в середине пролета ВЛ зачастую приходится понижать натяжение провода и таким образом опять увеличивать высоту опоры. При отказе от подвески грозотроса влияние механических нагрузок на опору гораздо снизится, высота опор также будет ниже (нет необходимости в монтаже тросостойки).

На сегодня российской компанией ОАО "НПО "Стример"" ведутся интенсивные разработки разрядников с так называемой мультикамерной системой (МКС). Предложен принципиально новый аппарат: изолятор-разрядник (ИР) с мультикамерной системой (ИРМК), который сочетает в себе свойства изолятора и разрядника одновременно. Основу ИРМК составляют обычно массово выпускаемые изоляторы, на которых специальным образом установлена МКС. Причем установка МКС не приводит к ухудшению изоляционных свойств изолятора, но благодаря ей он приобретает свойства разрядника. Поэтому в случае применения ИРМК на ВЛ не требуется применения грозозащитного троса. При этом снижается высота, масса и стоимость опор, а также стоимость всей ВЛ в целом, и обеспечивается надежная грозозащита линий, т.е. резко сокращается число отключений линий, и уменьшаются ущербы от недоотпуска электроэнергии и эксплуатационные издержки [10].

Основные преимущества применения ИРМК вместо грозотроса — это исключение грозовых отключений ВЛ; облегчение ее эксплуатации; отказ от заземления опор; уменьшение веса и стоимости опор или сокращение их количества.

ОАО "Стример" по договору с ОАО "ФСК ЕЭС" с 2010 г. проводит работы по созданию Системы комплексного мониторинга грозовой обстановки событий (СКМ) на ВЛ 220 кВ Цимлянская ГЭС — ПС "Ш-30" в Ростовской области [9].

С 2011 г. по инициативе АОА "Федеральная сетевая компания ЕЭС" осуществляется программа опытно-промышленной эксплуатации новых средств молниезащиты линий электропередачи с установкой гирлянд мультикамерных изоляторов-разрядников (ГИРМК). На ряду с проведением комплексного мониторинга молниевых разрядов впервые за последние 20 лет была поставлена также задача определения практической эффективности различных средств и методов исследования характеристик молнии и грозовой активности в условиях действующего электросетевого объекта.

Система мониторинга грозовой обстановки (СМГР) на трассах ВЛ предназначена для получения статических данных о грозовой активности (определения плотности ударов молнии в землю, участков ВЛ с избирательной грозопоражаемостью), предупреждения о грозовой обстановке на трассе ВЛ, идентификации ударов молнии в линию и(или) аварийных отключений ВЛ по дате, времени, месту удара, причине отключения ("грозовое" — "негрозовое").

Мониторинг грозовых воздействий и отключений ВЛ основывается на регистрации импульсов перенапряжений, возникающих при ударах молнии в линию, ближних ударах в землю, а также при КЗ на линиях.

Система мониторинга ударов молнии и грозовой обстановки на трассах ВЛ разработана в рамках базовой инновационной программы ОАО "ФСК ЕЭС" — "МОЛНИЕЗАЩИТА" в составе комплексной системы мониторинга грозовых разрядов на ВЛ 220 кВ "ЦГЭС-Ш-30" Ростовского ПМЭС Юга. Разработка СМГР преследовала двойную цель: получение информации по ударам молнии в линию и аварийным отключениям ВЛ для оценки эффективности работы изоляторов — разрядников мультикамерных (ИРМК), установленных на ВЛ 220 кВ "ЦГЭС-Ш-30", а также получение сравнительных данных по ударам молнии в линию для подтверждения работоспособности системы дистанционной пеленгации (СДП) разрядов молнии "Вайсала" [9].

На некоторых участках ВЛ 220 кВ "ЦГЭС-Ш-30" начиная с 2011 г. грозозащитные тросы были демонтированы и установлены гирлянды мультикамерных изоляторов-разрядников (ГИРМК). Согласно данным СМГР за период с 14.05 по 30.10.2011 г. на ВЛ 220 кВ "ЦГЭС-Ш-30"



были зарегистрированы 10 аварийных отключений ВЛ. В том числе, семь отключений по причине ударов молнии в линию, три — по иным причинам, не связанные с грозовыми воздействиями. Таким образом, результаты опытной эксплуатации подтверждают в целом работоспособность СМГР в соответствии с ее характеристиками. Точность определения расстояния до места удара и (или) КЗ на линии — не хуже 300 м (пролет ВЛ).

Оборудование ИРМК участка линии, безусловно, повысило ее. Процентные отношения количества разрядов, вызвавших отключение линии, к общему количеству зарегистрированных разрядов на защищенном и не защищенном ИРМК участках ВЛ по данным СКМ составили соответственно 11 и 32 % — в общем, 33 и 100 % — для участков без грозотроса.

В условиях отсутствия нормативных документов, регламентирующих выбор параметров и мест установки ОПН, а также отсутствия длительного опыта их эксплуатации на линиях, технические решения по их применению вырабатывают на основании компьютерного моделирования.

Наилучшие показатели грозоупорности имеют ВЛ, все фазы которых на каждой опоре защищены с помощью ОПН. Однако такой подход к расстановке ограничителей требует значительных затрат. Возникает задача выбора оптимального варианта расстановки ОПН вдоль трассы с частичной защитой фаз ВЛ. На основании проведенных расчетов разных вариантов мест установки ОПН вдоль трассы линии, оказалось, что установка ОПН предпочтительна в верхних фазах ВЛ, особенно в области сопротивлений заземления опор до 20 Ом. Это объясняется учетом в расчетной модели индуктированных составляющих напряжений на проводах и тросах ВЛ, которые тем больше, чем выше подвешен провод. В области небольших сопротивлений ЗУ опор эти составляющие в течение времени фронта тока молнии оказывают существенное влияние на импульсные напряжения на гирляндах изоляторов. При сопротивлениях ЗУ более 50 Ом падение напряжения на заземлителе опоры становится доминирующим, а вклад индуктированных составляющих напряжения — меньше.

Поскольку разряд молнии характеризуется целым набором параметров, адекватный учет которых можно проводить только на основе проведения статистических расчетов, то при определении энергетической нагрузки на ОПН с целью их выбора, необходим обобщенный интегральный подход учитывающий энергию импульса,

При выборе оптимального способа расста-

новки ОПН на ВЛ рекомендуется сопоставлять варианты с одинаковым числом ОПН на опоре. На выбор оптимального варианта влияет сопротивление заземления опоры, поэтому, если ограничители применяются для защиты ВЛ по всей длине, целесообразно варьировать схемы расстановки ОПН вдоль трассы в зависимости от значений Роп на отдельных ее участках, а также учитывать рельеф местности и наличие водоемов.

Для повышения надежности защиты электрических сетей от перенапряжений необходимо пересмотреть требования ПУЭ по использованию тросовой защиты с обязательным введением ОПН, необходимо также разработать методические указания по выбору ОПН с учетом природно-климатических условий региона и оценке эффективности различных схем установки ОПН на опоре и трассе ВЛ.

Выводы. Одной из серьезных проблем в процессе организации защиты оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений является то, что нормативная база в этой области до настоящего времени разработана недостаточно. Существующие нормативные документы либо содержат в себе устаревшие, не соответствующие современным условиям требования, либо рассматривают их частично, в то время как решение данного вопроса требует комплексного подхода.

Для улучшения показателя грозоупорности ВЛ необходимо прежде всего восстановление традиционных грозозащитных тросов на ВЛ, где они демонтированы, а при проектировании новых ВЛ, особенно в зонах повышенной грозовой активности, необходимо использовать опоры с малыми углами грозозащиты.

Одним из современных эффективных способов улучшения показателя грозоупорности ВЛ является установка ОПН в дополнение к грозотросу. При определении целесообразных мест установки ОПН необходимо имитационное моделирование как коммутационных, так и грозовых перенапряжений на конкретной ЛЭП, а также разработка методик определения опор с повышенным уровнем вероятности поражения молнией на основе интеллектуальных методов с использованием нечеткой логики и нейросетей, позволяющих в условиях неопределенности и сложности процессов найти приемлемые решения для ограничения перенапряжений в электрических сетях.

Для защиты высоковольтной изоляции ВЛ напряжением 35...110 (220) кВ от грозовых перенапряжений в гололедных районах, а также в местах, где невозможно обеспечить нормированное заземление опор, взамен грозотроса необходимо применение: ОПН; длинноискровых и мультика-



мерных разрядников; изоляторов, совмещенных с мультикамерными разрядниками.

Использование ОПН для защиты ЛЭП может быть оптимальным и экономически оправданным шагом, если производить установку ОПН на некоторых "критичных опорах" с учетом сопротивления грунтов, уровня рельефа (профиля), наличия водной поверхности. Это позволит существенно повысить грозоупорность линии и сократить количество обратных перекрытий изоляции, следовательно, существенно повысить надежность электроснабжения потребителей.

При определении необходимого количества ОПН и мест их вдоль трассы линии необходимо учитывать реальный профиль трассы, ее топографию, высоту опор, сопротивление заземления, характеристики опор и грунтов, которые также оказывают существенное влияние на грозоповреждаемость ВЛ.

Одной из актуальных проблем на сегодня является создание системы мониторинга ударов молнии и грозовой обстановки на трассах ВЛ Украины с целью создания достоверной карты районирования Украины по грозовой активности, а также для идентификации ударов молнии в линию и аварийных отключений ВЛ по дате, времени, месту удара и причине отключения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений* / Под ред. Н.Н. Тиходеева. — СПб.: Изд-во ПЭ-ИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
2. *Александров Г.Н. Молния и молниезащита*. — М.: Наука, 2008. — 274 с.
3. *Аронов М.А., Аношин О.А., Кондратов О.И., Лопухова Т.В. Ограничители перенапряжения в электроустановках 6–750 кВ/ Методическое и справочное пособие*. — М.: Знак, 2001. — 232 с.
4. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Летвинов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты*. — Л.: Гидрометеороиз-

дат, 1978. — 223 с.

5. *Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них: Учеб. для вузов*. — С-Пб: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1995. — 320 с.

6. *Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учеб. для вузов./ 3-е изд., перераб. и доп.* — М: Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.

7. *Барг И.Г., Эдельман В.И. Воздушные линии электропередач: вопросы эксплуатации и надежности*. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

8. *Злобин Ю.И., Немцев Г.А. Перенапряжения в системах электроснабжения. Учеб. пособие*. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2004. — 80 с.

9. *Золотых А.Г., Озеров А.Н., Евтеев С., Лепешики Д. Опыт применения систем дистанционной пеленгации молниевых разрядов для нужд ОАО "ФСК ЕЭС": Сб. тр. 7-й Всероссийской конференции по атмосферному электричеству, 2012.*

10. *Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Калакутский Е.С., Пильщиков В.Е., Сиваев А.Д. Грозозащита ВЛ 3–35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников. Сб. тр. 3-й Российской конференции по молниезащите, 2012.*

11. *Раков В.А. Современные пассивные радиотехнические системы местоопределения молний. // Метеорология и гидрология*. — 1990.

12. *Demailly B., Tullus L., Maciela F., Tartier S. Installation of composite surge arrestors on transmission lines//WG 33.203. Task Force 203, 2002.*

13. *Kawamura T., Nagano M., Ichihara M., Ishikawa K., Mizoguchi S., Imakoma T., Shimomura T. Development of metal-oxide transmission line arrester and its effectiveness// CIGRE, 1994 Session*. — Rep. 33.201

14. *DE Franco J.L., Bezerra A.C.G., Andrade A.D. Improvement of the transmission lines lightning performance using line arresters: experience of Brazilian utilities// CIGRE paper A3-102, Paris 2006.*

