

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОК ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

АВТОРЫ:

С.Н. КАРЕВА,
А.В. КАЩЕЕВ, К.Э.Н.,
И.А. НАЗАРОВ,
А.С. МЕРЗЛЯКОВ,
В.В. СМЕКАЛОВ, К.Т.Н.,
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Р.Г. ШАМОНОВ, К.Т.Н.,
«РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Технологии, обеспечивающие управление режимами энергосистем на основе «динамических допустимых токовых нагрузок», являются, по существу, философией работ при пере-

даче электроэнергии, направленной на максимальное использование возможностей ВЛ для увеличения нагрузки (особенно в аварийных ситуациях) в реальных условиях окружающей среды.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; противоаварийная автоматика; ограничение перегрузки; температура провода; управляющие воздействия.



Блок противоаварийной автоматики на современной подстанции

ВВЕДЕНИЕ

Рост электропотребления и усложнение условий для электросетевого строительства характерны для большинства промышленно развитых стран. В связи с этим крайне актуальным является развитие технологий, обеспечивающих повышение степени использования пропускной способности существующих электрических сетей с отказом от строительства новых подстанций (ПС) и линий электропередачи или переносом его на более поздний срок.

Для предотвращения и ликвидации недопустимой перегрузки электросетевых элементов в послеаварийных режимах работы энергосистемы используется противоаварийная автоматика (ПА). Устройства автоматики ограничения перегрузок оборудования (АОПО) предназначены для выполнения следующего функционала: изменение конфигурации электрической сети, отключение части потребителей электрической энергии, категория надежности которых допускает перерыв электроснабжения, отключение оборудования (линий электропередачи, трансформаторов), загрузка/разгрузка/ограничение генерации.

Современные устройства АОПО воздушных линий (ВЛ) действуют на основе заданных уставок по току, которые рассчитываются, исходя из наихудших условий охлаждения провода (наличие солнечной радиации, слабый ветер), и в лучшем случае учитывают фактическую температуру окружающей среды. При наличии условий, обеспечивающих лучшее по сравнению с базовыми условиями охлаждение провода (сильный ветер, осадки, облачность), имеет место недоиспользование пропускной способности ВЛ при управлении электрическими режимами энергосистемы. Это отражается на избыточных управляющих воздействиях (УВ) АОПО и сниже-

нии надежности электроснабжения потребителей.

В целях совершенствования противоаварийного управления и исключения описанных выше негативных факторов существующей АОПО необходима разработка автоматики, способной учитывать фактические условия эксплуатации ВЛ и в режиме реального времени определять ее допустимые токовые нагрузки с соответствующей корректировкой необходимых УВ при аварийных ситуациях.

ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ АОПО

В настоящее время в электроэнергетике РФ применяются два типа ПА с различными подходами к реализации функции АОПО:

- классическое устройство автоматики ограничения перегрузки линии, или автоматики разгрузки линии (АРЛ);
- устройство АОПО с контролем температуры окружающего воздуха.

АРЛ использует измеренное значение тока в проводе каждой фазы и информацию о направлении перетока активной мощности в ВЛ и обычно содержит набор сезонных уставок по току, который в большинстве случаев ограничивается двумя («зима», «лето») или тремя («зима», «межсезонье», «лето») сезонами. Выбор сезонной уставки оперативным персоналом ПС производится по распоряжению диспетчера.

Устройство АОПО с контролем температуры воздуха в отличие

от классического АОПО позволяет более полно использовать пропускную способность линии за счет применения температурно-токовых таблиц, рассчитанных для диапазона температур наружного воздуха от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (как правило, с шагом $5\text{ }^{\circ}\text{C}$), либо построенной по этим данным кусочно-линейной функции допустимого тока от температуры воздуха. Датчики температуры наружного воздуха устанавливаются на территории ПС в количестве не менее двух штук (на случай отказа одного из них).

Расчет аварийно-допустимых токовых нагрузок (АДТН) для занесения в терминал АОПО в качестве уставки проводится по условиям нагрева с сохранением механической прочности проводов (для невысокотемпературных проводов марок А и АС по ГОСТ 839–2019 аварийно-допустимая температура провода (АДТП) составляет $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) либо до меньшей температуры в случае возникновения угрозы нарушения допустимых габаритов ВЛ. Длительно допустимые токовые нагрузки (ДДТН) рассчитываются, исходя из длительно допустимой температуры провода (ДДТП) $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ по требованиям ПУЭ-7 (для невысокотемпературных проводов марок А и АС по ГОСТ 839–2019). Однако в любом случае расчет допустимых токовых нагрузок (ДТН) ВЛ ведется для наихудших условий охлаждения провода, поэтому зачастую в реальности АОПО срабатывает при токах, которые меньше реально допустимых для данных фактических условий охлаждения проводов, что приводит к избыточным УВ.

Все применяемые в электроэнергетике РФ типы АОПО позволяют формировать команды на реализацию следующих УВ:

- отключение защищаемой ВЛ с запретом автоматического повторного включения (АПВ);

- автоматическая загрузка генерации в дефицитной части энергосистемы;
- кратковременная и длительная разгрузка турбин блоков электрических станций в избыточной части энергосистемы;
- ограничение генерации электрических станций в избыточной части энергосистемы;
- изменение режима работы и эксплуатационного состояния управляемых элементов электрической сети (вставок и передач постоянного тока);
- изменение топологии электрической сети;
- ограничение нагрузки в дефицитной части энергосистемы.

Как правило, устройства АОПО имеют до четырех ступеней, пуск которых определяют уставки по токовой нагрузке с соответствующими выдержками по времени до срабатывания ступени:

- первая ступень АОПО используется в качестве сигнальной ступени, запускается обычно одновременно со второй ступенью АОПО;
- вторая ступень АОПО запускается при превышении ДДТН в линии и после заданной выдержки по времени срабатывает и, таким образом, происходит

формирование команд на реализацию требуемых УВ (из приведенного выше перечня). Суммарное время работы второй ступени обычно составляет 20 мин (1200 с);

- третья ступень АОПО запускается при превышении АДТН в линии, после заданной выдержки по времени срабатывает и, таким образом, происходит формирование команд на реализацию требуемых УВ;
- четвертая ступень АОПО служит для отключения защищаемой ВЛ с запретом АПВ, в случае если не прошли команды на реализацию УВ от второй или третьей ступеней либо объема выполненных УВ было недостаточно. Запускается обычно через несколько секунд после реализации последнего УВ третьей ступени, если токовая нагрузка не опустилась ниже АДТН.

Уставки по пусковому току и по времени срабатывания ступеней, а также объем УВ определяется Системным оператором в конкретной операционной зоне.

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК ВЛ

В мировой практике нашли применение несколько подходов к опре-

делению ДТН линии. Величина ДТН может быть постоянной (static line rating), т. е. задаваемой вручную для определенного периода времени. Такая уставка рассчитывается для абсолютно всех линий как за рубежом, так и в России. Как правило, значение зависит от сезона. В США оно рассчитывается для фиксированных условий эксплуатации и должно ограничивать перегрузки для 98 %-ной вероятности¹ одновременного наступления наихудших возможных условий по всем основным параметрам окружающей среды. Величины ДТН различаются для нормального режима, а также для послеаварийных режимов — кратковременного (STE), продолжительностью до 15 мин, и длительного (LTE), продолжительностью до 4 ч.

В ряде стран, особенно в тех регионах, где наблюдаются существенные колебания температуры, применяется величина ДТН, скорректированная по внешним условиям (ambient-adjusted line rating). Такая уставка корректируется периодически (ежедневно, ежечасно или даже чаще). Метод периодического корректирования основан на прогнозе температуры воздуха. Например, если сезонная токовая нагрузка для летнего периода рассчитана для 35 °С, то в случае наличия прогноза, в соответствии с которым в течение следующих 24 ч температура воздуха не превысит 25 °С, токовая нагрузка может быть увеличена на 10%. Недостатком этого метода является то, что при таких расчетах учитывается только один параметр,

изменяющийся во времени, — температура воздуха, а воздействие ветра и солнечной радиации не учитывается. Подобный подход к определению допустимой токовой нагрузки широко применяется в США.

И наконец, уставка может быть динамической (dynamic line rating, DLR), т. е. рассчитанной с использованием данных, поступающих в режиме реального времени. Такие системы являются естественным и логичным усовершенствованием систем расчета уставки статически, по временам года и по внешним условиям.

В зарубежной литературе на данный момент не существует единой стандартизированной терминологии обозначения элементов систем DLR, а также величин, применяемых при расчетах, ни на английском, ни на русском языке. Наиболее близкий смысловой перевод DLR — динамическая ДТН. Следует отметить, что в России применяются два значения ДТН: ДДТН и АДТН. Понятие DLR может относиться как к одному, так и к другому значению.

Применение систем DLR (под системой DLR понимается программно-технический комплекс для расчета значения DLR (т. е. фактического допустимого тока), включая системы сбора исходных данных и/или передачи его в системы мониторинга) позволяет определять пропускную способность, опираясь на фактические условия эксплуатации. При этом предполагается, что наступление наихудших внешних условий (по которым рассчитывается статическая уставка) с очень малой вероятностью совпадет по времени с периодом пиковых нагрузок. Кроме того, учитывается, что внешние условия, такие как температура окружающего воздуха, скорость и направление

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЛ

Условия эксплуатации	Изменение условий	Влияние на пропускную способность
Температура воздуха	Уменьшение на 2 °С	+ 2%
	Уменьшение на 10 °С	+ 11%
Уровень солнечной радиации	Переменная облачность	+/- несколько процентов
	Полное затмение	+ 18%
Скорость ветра	Увеличение на 0,6 м/с, угол к трассе 45°С	+ 35%
	Увеличение на 0,6 м/с, угол к трассе 90°С	+ 44%

Таблица 1

ветра (в том числе по отношению к трассе ВЛ), наличие дождя или обледенения проводов, уровень солнечной радиации, изменяются во времени и по длине линии, оказывают влияние на температуру провода и являются причиной изменения пропускной способности ВЛ. Поэтому применение систем DLR позволяет оптимизировать эксплуатацию линии (т. е. обеспечить при необходимости увеличение перетока мощности) за счет более точного определения ее допустимой токовой нагрузки в режиме реального времени. Хотя сами по себе технологии DLR не увеличивают пропускную способность ВЛ, они показывают ее текущие возможности. В табл. 1 приведено вероятное увеличение пропускной способности ВЛ при изменении внешних условий по данным ряда зарубежных источников.

Технологии DLR фактически доступны уже более 30 лет. Для кабельных линий технологии мониторинга в режиме реального времени были разработаны в конце 1970-х. В 1990-е гг. были разработаны технологии для ВЛ электропередачи [1].

За последнее десятилетие системы DLR получили существенное развитие. С начала 2010-х гг. технологии DLR развились от стадии теоретических исследований и первых пилотных систем до широкомасштабного использования в энергосистемах США, Канады и ряда европейских стран [2–13]. Также подобные системы установлены на отдельных линиях в Бразилии и многих сетях Австралии и Новой Зеландии. В РФ на сегодняшний день эти системы не применяются. География применения таких систем приведена на рис. 1.

Практически все зарубежные системы сегодня имеют схожую архитектуру. В общем случае система состоит из трех уровней. Нижний уровень включает в себя датчики, установленные непосредственно на ВЛ. Системы DLR предполагают установки метеодатчиков для измерения скорости и направления ветра, температуры воздуха и уровня солнечной радиации и/или сбор данных о температуре провода (точечно или распределенно), тяжении, величине стрелы провеса.

¹ Понятие «вероятность непревышения» (или его аналога — «обеспеченность») при определении климатических параметров широко применяется в отечественной и зарубежной практике. В частности, в РФ при проектировании ВЛ применяются значения максимальной скорости ветра или толщины стенки гололеда с вероятностью непревышения 96%. Это означает, что теоретически превышение принятой величины возможно в течение 4% времени года (или, другими словами, превышение расчетных условий статистически возможно один раз в 25 лет). За рубежом в большинстве стран требования более жесткие и используется вероятность непревышения 98% (один раз в 50 лет).

ГЕОГРАФИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ DLR



Рис. 1

Данные с датчиков нижнего уровня по радиоканалу (или при помощи иных средств связи) передаются на средний уровень (приемное устройство на ПС). Далее они передаются на верхний уровень — в систему SCADA или EMS, осуществляющую обмен информацией с сервером, на котором реализована модель расчета DLR, а также управляет результатами этих расчетов в диспетчерские центры.

Следует отметить, что на среднем уровне системы не происходят никаких расчетов, а также в него не попадают данные с ее верхнего уровня.

Опционально система может содержать некоторые дополнительные элементы, не характерные для «классической компоновки» систем DLR, в зависимости от необ-

ходимости в дополнительном функционале системы. Например, в Румынии [7], кроме датчиков, передающих информацию о параметрах провода, в системах DLR дополнительно устанавливается подсистема мониторинга актов вандализма, что представляет в этой стране серьезную проблему для электросетевых организаций. Такие системы содержат датчики, сигнализирующие о проникновении в охранную зону опор ВЛ, отслеживающие и ведущие видеозапись активности в охранной зоне, определяющие работу режущих (пила, гидравлические ножницы) или ударных (молоток) инструментов на теле опоры, сообщающие о перерезании оттяжки, также они оснащены системой звуковой сигнализации, оповещающей человека о пересечении границ охранной зоны ВЛ, и дополнительны-

ми устройствами защиты опор ВЛ в тех регионах, где это разрешено местным законодательством.

Основными преимуществами технологий DLR являются: возможность мониторинга пропускной способности линии в режиме реального времени; повышение надежности и безопасности сети; оптимизация использования существующих электросетевых активов; оптимизация капиталовложений в электросетевое строительство.

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ АОПО

Десять лет назад за рубежом системы DLR были предметом исследований, пять лет назад разработки дошли до стадии запуска пилот-

ных проектов. Сегодня системы DLR — это стандартный инструмент для выдачи мощности возобновляемых источников энергии, резервирования ВЛ в «узких сечениях» при выводе из работы параллельных цепей, а также возможность при необходимости обеспечить передачу большей по сравнению с проектной величиной мощности по ВЛ без ее переустройства или технического перевооружения.

На сегодняшний день электросетевой комплекс РФ сталкивается с проблемами, аналогичными тем, которые решаются за рубежом посредством применения систем DLR. Разрабатываемая в настоящее время в «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» технология, направленная на повышение степени использования пропускной способности существующих электрических сетей, основана на изучении международного опыта построения систем DLR и адаптации его к отечественной практике эксплуатации ВЛ с расширением в части применения АОПО с учетом фактических условий работы ВЛ.

Разрабатываемая ПА с функцией АОПО должна сочетать в себе основные принципы работы АОПО ВЛ с контролем температуры воздуха, однако срабатывание ступеней автоматики происходит по факту превышения измеренной температуры провода над допустимой — в этом заключаются новизна и основное отличие от существующих АОПО, что позволит максимально полно использовать пропускную способность ВЛ и не приводить к избыточным УВ.

Динамические уставки ДДТН и АДТН должны рассчитываться в терминале ПА по текущим условиям нагрева и охлаждения провода с постоянной коррекцией по измеренной температуре провода на ВЛ в режиме реального времени. Это, в свою очередь, при передаче текущих динамических уставок в региональ-

ное диспетчерское управление (РДУ) позволит использовать максимальную пропускную способность линии при управлении электрическими режимами энергосистемы, повышая надежность передачи электроэнергии по электрической сети. Описанный механизм лежит в основе современного подхода к созданию АОПО.

Основными критериями создания нового типа устройств АОПО являются:

- двух- или трехуровневая схема реализации ПА, включающая в себя систему непрерывного мониторинга температуры проводов и метеопараметров (далее — система мониторинга) и терминал ПА с функцией АОПО по температуре провода;
- сохранение всех функций АОПО, применяемых в настоящее время в электроэнергетике РФ (в качестве резервных режимов работы на случай отказа системы мониторинга), в том числе мгновенный переход на резервные режимы работы автоматики;
- вычисление значений установившейся температуры провода в темпе процесса по модели теплового баланса [14] с обязательной адаптацией расчетной модели по измеренной температуре провода с датчиков и в ручном, и в автоматическом режиме, подстраивающейся под параметры защищаемой ВЛ, учитывающей и неточности задания коэффициентов для расчетной модели (коэффициентов, связанных с поверхностным эффектом и магнитными потерями при протекании электрического тока, коэффициентов поглощения солнечной радиации и излучения тепла с поверхности

провода), и такие погодные явления, как дождь, изморось, снег, образование наледи на поверхности провода, которые не учитываются в упомянутой модели [14];

- вычисление в темпе процесса значений ДДТН и АДТН по адаптированной расчетной модели;
- срабатывание ступеней противоаварийной автоматики с учетом текущей температуры проводов ВЛ.

Схема реализации ПА представлена на рис. 2.

Структурно систему ПА можно разделить на три уровня:

1) **нижний** уровень системы ПА представляет собой набор оборудования, состоящего из измерительных датчиков и пунктов контроля, а также каналов передачи данных на средний уровень. Каждый пункт контроля ВЛ собирает информацию от датчиков температуры проводов, совмещенных с датчиками измерения углов схождения одновременно по трем фазам и датчиками измерения метеопараметров (датчик температуры и влажности воздуха, датчик скорости и направления ветра, датчик солнечной радиации). Обмен информацией между датчиками и пунктом контроля может производиться по радиоканалу. Далее информация в оцифрованном виде передается по GPRS/GSM, спутниковому каналу, ВОЛС (возможны разные варианты реализации каналов передачи данных) от пунктов контроля, расположенных на выбранных опорах ВЛ, на средний уровень системы — в пункт приема — для дальнейшей обработки;

2) **средний** уровень системы ПА состоит из размещенных в одном шкафу пункта приема данных (сервер)

и терминала ПА (на базе промышленного серийного терминала ПА с функциями АОПО), позволяющего формировать описанные выше команды на реализацию УВ. На случай отказа системы мониторинга целиком или ее отдельных компонентов в терминале ПА предусматривается вычисление ДДТН и АДТН и формирование команд УВ по двум резервным алгоритмам классической АОПО — температуре воздуха на ПС, а также по сезонным уставкам;

3) **верхний** уровень системы является необязательным для функционирования ПА, однако может быть построен по архитектуре «клиент — сервер», и выполнять следующие функции:

- сбор, хранение, обработка и анализ всех данных, поступивших от среднего и нижнего уровней системы;
- вычисление вертикальных расстояний от проводов до земли и/или пересекаемых объектов в пролетах контролируемой ВЛ, что может позволить в автоматическом режиме определять ДДТП и АДТП в случае угрозы нарушения габаритов ВЛ;
- предоставление доступа линейным службам и ЦУС ПМЭС/МЭС к данным через специализированное клиентское ПО.

НОВЫЙ ПОДХОД К СРАБАТЫВАНИЮ СТУПЕНЕЙ ПА

Непосредственный контроль температуры проводов защищаемой ВЛ, а также адаптивная модель для расчета температуры провода в установившемся режиме и рас-

чета допустимых токов позволили предложить новый подход к реализации команд ПА, направленный, с одной стороны, на наиболее полное использование пропускной способности защищаемой ВЛ в режиме перегрузки и снижения количества вынужденных отключений потребителей, а с другой стороны, на недопущение перегрева проводов. Предлагается следующая схема реализации пуска и срабатывания ступеней, измененная относительно классического АОПО.

ПЕРВАЯ И ЧЕТВЕРТАЯ СТУПЕНИ

Первая ступень ПА запускается при достижении проводом температуры ДДТП (в наиболее нагретой точке измерения). Данная ступень остается по-прежнему сигнальной, т. е. информирует о том, что ВЛ находится в режиме перегрузки.

Четвертая ступень ПА запускается при достижении проводом температуры АДТП (в наиболее нагретой точке измерения). Данная ступень также аварийная, через минимально допустимую выдержку по времени (секунды) выдает команду на отключение защищаемой ВЛ с запретом АПВ.

Таким образом, задачи первой и четвертой ступеней остаются неизменными по сравнению с классическим АОПО.

ВТОРАЯ И ТРЕТЬЯ СТУПЕНИ

Вторая и третья ступени ПА служат для формирования команд на разгрузку ВЛ, т. е. для формирования команд на реализацию заданных в проекте УВ, для исключения ситуации с нагревом проводов ВЛ до АДТП и срабатывания четвертой ступени.

Вторая ступень запускается одновременно с первой при достижении проводом температуры ДДТП

при условии, что токовая нагрузка ВЛ превышает ДДТН, но не превышает АДТН. Уставки по времени для формирования команд на реализацию УВ от данной ступени аналогичны применяемым в настоящее время АОПО (максимальная длительность команды на реализацию последнего УВ от второй ступени 1200 с). Кроме того, достаточность реализованного УВ, если к ступени их привязано несколько, определяется путем расчета температуры провода в установившемся режиме после формирования воздействия, и если значение линейного тока уменьшилось настолько, что расчетная температура провода в установившемся режиме не превышает ДДТП, то команда на следующее УВ ступенью не формируется.

Преимуществом данного подхода к пуску и срабатыванию второй ступени по сравнению с существующими АОПО является увеличенное безопасное время существования режима перегрузки ВЛ, поскольку учитывается дополнительное время нагрева провода с текущей температуры до ДДТП (например, 70 °С), что в сумме может значительно превосходить заданные 20 мин., в течение которых в сети могут измениться перетоки мощности таким образом, что не придется формировать УВ и осуществлять вынужденные отключения потребителей.

Третья ступень ПА запускается одновременно со второй ступенью при достижении проводом температуры ДДТП, но при условии, что токовая нагрузка ВЛ превышает АДТН. Однако уставка по времени на срабатывание ступени и формирование от нее команд на реализацию УВ динамическая и зависит от скорости нагрева провода. То есть формирование всех команд на реализацию УВ от ступени будет происходить

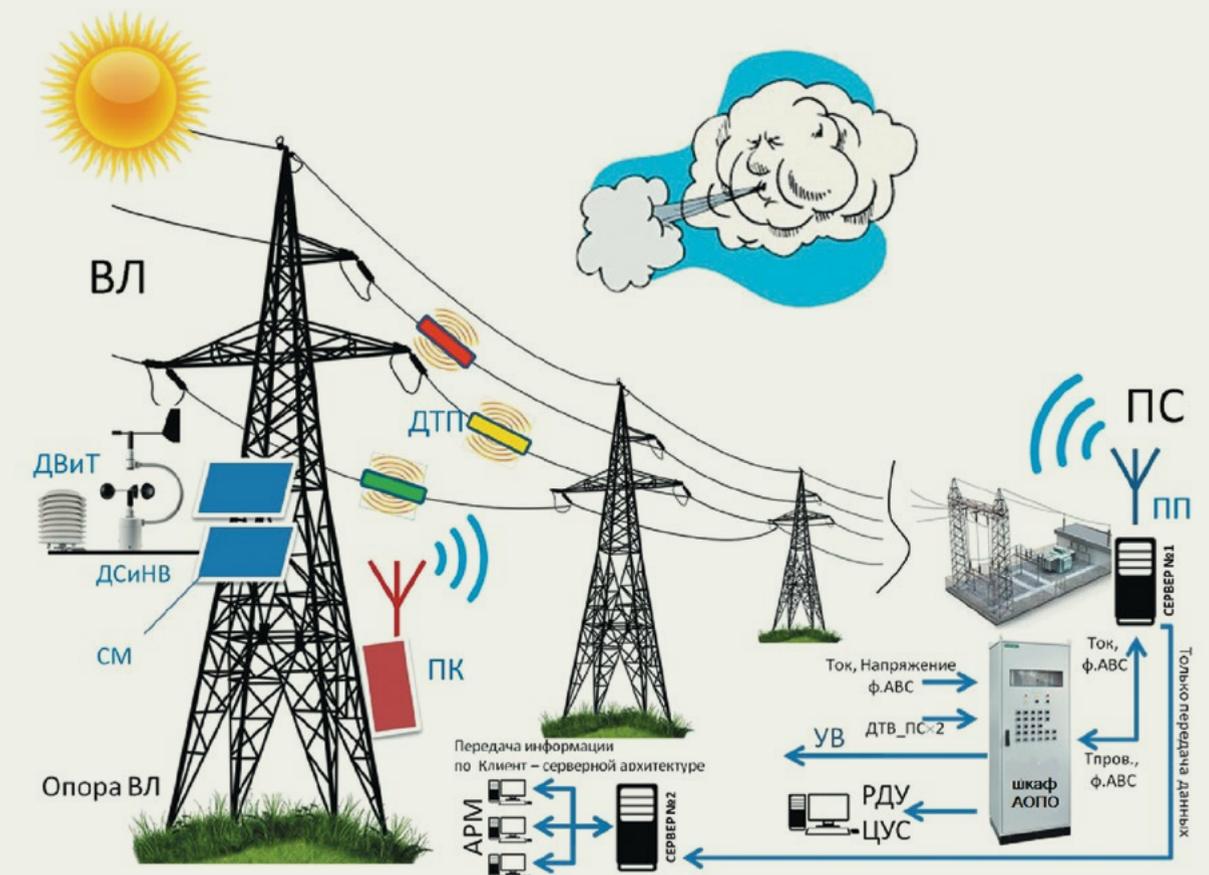
за определенное количество секунд до достижения проводом аварийно-допустимой температуры. Поэтому в качестве уставок по времени для данной ступени задаются времена формирования команд на реализацию УВ до нагрева провода до АДТП (например, если предусмотрено проектом три УВ: УВ1 — за 45 с, УВ2 — за 30 с, УВ3 — за 15 с). В случае если после формирования УВ3 и изме-

рения линейного тока расчетная температура провода в установившемся режиме остается по-прежнему выше АДТП, то по ее достижении срабатывает четвертая ступень ПА.

Таким образом, если ВЛ была слабо загружена до возникновения аварийного режима, длительность безопасной работы ВЛ может значительно (в разы) превысить

жестко заданное установленной автоматикой время, исчисляемое от десятков секунд до нескольких минут. А если учитывать тот факт, что в существующем АОПО ДДТН и АДТН не зависят, по крайней мере, от температуры воздуха, скорости и направления ветра вдоль линии, их значения во многих случаях будут заниженными и не соответствующими ДДТП и АДТП, поэтому предложенный подход к пуску

СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИКИ



Обозначения:

ДВиТ — датчик влажности и температуры воздуха;
 ДСиНВ — датчик скорости и направления ветра;
 СМ — блок солнечного модуля;
 ДТП — датчик температуры провода;
 ПК — пункт контроля параметров ВЛ;

ПП — пункт приема;
 АРМ — автоматизированное рабочее место;
 ДТВ_ПС — датчик температуры воздуха, расположенный на ПС;
 УВ — управляющее воздействие.

Рис. 2

и срабатыванию третьей ступени позволит наиболее полно (по величине и длительности) использовать пропускную способность ВЛ в режиме перегрузки.

Также следует подчеркнуть, что независимо от вычисленных ДДТН, АДТН защищаемой ВЛ и текущей температуры провода, если линейный ток превышает АДТН «концевого» оборудования (трансформаторы тока, ВЧ-заградители и пр.), пуск третьей ступени происходит по алгоритмам работы существующего АОПО для защиты оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологии, обеспечивающие управление режимами энергосистем на основе DLR (ДТН линий электропередачи), определяемых в темпе процесса, являются типовым решением повышения пропускной способности сети в зарубежных энергосистемах. Однако в России опыт применения подобных систем практически отсутствует.

На сегодняшний день «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» разработан и создан опытный образец АОПО по новым принципам, включающий:

- системы непрерывного мониторинга температуры проводов и метеопараметров;
- серийно изготавливаемый терминал ПА с функцией АОПО;
- реализованные алгоритмы функционирования, позволяющие выполнять адаптивный функционал системы ПА, проводить проверку достоверности поступающей, обрабатываемой и передаваемой информации, обеспечивать надежность

и бесперебойность функционирования всей системы, в том числе в случае отказа элементов системы непрерывного мониторинга ВЛ.

При реализации алгоритмов работы терминала ПА была разработана функция адаптации расчетной модели по обратной связи с измеренной температурой провода, что позволило сделать расчетную модель адаптивной, т. е. подстраивающейся под параметры защищаемой ВЛ, а также под такие погодные явления, как дождь, изморось, снег, образование наледи на поверхности провода, влияние которых на температуру провода в настоящее время нигде аналитически не описано и не учитывается.

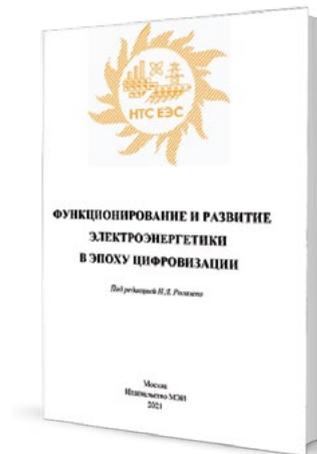
Предложен новый подход к реализации команд ПА (формированию команд на реализацию УВ), направленный, с одной стороны, на наиболее полное использование пропускной способности защищаемой ВЛ в режиме перегрузки и, таким образом, на снижение количества вынужденных отключений потребителей, а с другой стороны, обеспечивающий недопущение перегрева проводов свыше аварийно-допустимой температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dynamic Line Rating Systems for Transmission Lines. Topical Report/S. Bossart, et al. U. S. Department of Energy, 2014.
2. Dawson L., Karimi S., Knight A.M. Quantifying the Risk in Dynamic Thermal Line Rating//CIGRÉ Session paper. 2018. B2–105.
3. McCall J., Bliss R., Nadeau D. Reliability Based Transmission Capacity Forecasting//CIGRÉ Session paper. 2018. B2–102.
4. Integrating Enhanced Dynamic Line Rating into the Real-time State Estimator Analysis and Operation of a Transmission

Grid Increases Reliability, System Awareness and Line Capacity/Goodwin T. et al.//CIGRÉ Session paper. 2014. B2–208.

5. Reich K., Mika G., Puffer R. Potential analyses for dynamic rating optimization on basis of four years of operational experience in Austria//CIGRÉ Session paper. 2018. B2–104.
6. Operational aspects of dynamic line rating. Application to a real case of grid integration of wind farms/Gonzalez A., et al.//CIGRÉ Session paper. 2016. B2–105.
7. Real Time Measurements for Online Monitoring and Intelligent Management of High Voltage Transmission Lines/Moldoveanu C., et al.//CIGRÉ Session paper. 2016. B2–211.
8. Integration of 2 days-ahead capacity forecast to manage Belgian energy Imports/Skivee F., et al.//CIGRÉ Session paper. 2016. C2–120.
9. Dynamic Assessment of Overhead Line Capacity for integrating Renewable Energy into the Transmission Grid/Fernandez de Sevilla S., et al.//CIGRÉ Session paper. 2014. B2–207.
10. Thermo-mechanical dynamic rating of OHTL: applications to Italian lines/Giuntoli M., et al.//CIGRÉ Session paper. 2014. C2–112.
11. Regis Jr. O., Domingues L.A.M.C. Increasing the transfer capacity of overhead lines on the connection of wind power plants, through correlation between climatic data and temperature of conductors at higher currents//CIGRÉ Session paper. 2016. B2–102.
12. Experience in the Application of Dynamic Transmission Line Ratings in the Australian and New Zealand Power Systems/Athanasius G., et al.//CIGRÉ Session paper. 2014. C2–102.
13. Ferris R. More Wind, More Power, More Line Capacity//Transmission & Distribution World. Russian Edition. Приложение к журналу «Электроэнергия. Передача и распределение». 2012. № 5 (14). С. 34–38.
14. СТО 56947007–29.240.55.143–2013 «Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий».
15. Тимашова Л.В., Назаров И.А., Мерзляков А.С. Допустимые токовые нагрузки для проводов воздушных линий//Энергия единой сети. 2013. № 1 (6). С. 30–39.



ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ: СБОРНИК ПОД РЕД. Н.Д. РОГАЛЕВА

М.: Изд-во МЭИ, 2021. 272 С.

Некоммерческое партнерство «Научно-технический совет Единой энергетической системы» (Партнерство) в качестве соорганизатора Российского международного энергетического форума, который прошел 21–23 апреля 2021 г. в Санкт-Петербурге, провело на площадке форума круглый стол, на котором было заслушано 18 докладов. Основными темами обсуждения на круглом столе были функционирование и развитие энергетики в эпоху цифровизации, модернизация генерирующих мощностей, кибербезопасность в ТЭК, распределенная генерация, экономика, цифровизация, подготовка кадров. В сборнике представлены статьи ведущих ученых и специалистов отрасли по темам круглого стола.



СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ. ЧАСТЬ 1

Воротницкий В.Э., Могиленко А.В. Библиотечка электротехника. 2021. № 4–5 (268–269). С. 1–144

Рассмотрены вопросы, являющиеся вводными к обзору методов и средств снижения потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4–110 кВ, в том числе: структура, терминология, особенности расчета и сравнительного анализа потерь электроэнергии; динамика потерь; методы их нормирования и стимулирования снижения, а также покупки потерь электроэнергии на рынках электроэнергии различных стран.

Выполнено сопоставление зарубежного опыта с отечественным, приведены примеры по основным разделам обзора. Для специалистов, работающих в научных, проектных и эксплуатационных организациях, занимающихся вопросами расчета, нормирования и снижения потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях, а также для студентов, бакалавров и магистров электротехнических и электроэнергетических специальностей.



ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И АВАРИЙНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Хренников А.Ю. М.: ЛИТРЕС, 2021. 230 С.

Представлен анализ методов диагностики состояния электрооборудования для выявления дефектов и повреждений в процессе эксплуатации. Эффективность применения методов диагностики сопровождается примерами обнаружения дефектов и повреждений конкретного оборудования: силовых трансформаторов, реакторов, трансформаторов тока и напряжения, разъединителей, турбогенераторов, ОПН и т.д. Приведены примеры повреждений и расследования технологических нарушений. Рассмотрены вопросы электродинамических испытаний силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ, которые служат инструментом для повышения надежности их конструкции. Предназначено для руководителей и специалистов технических служб предприятий электрических и распределительных сетей, станций, подразделений технической инспекции и служб.