

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

16+
ISSN 2071-6168

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

Тула
Издательство ТулГУ
2021

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель
Грязев М.В., д-р техн. наук.
Первый заместитель председателя
Воротилин М.С., д-р техн. наук.
Заместитель председателя
Прейс В.В., д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.
Ответственный секретарь
Фомичева О.А., канд. техн. наук, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, –
гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;
Берестнев М.А., канд. юрид. наук, –
гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;
Борискин О.И., д-р техн. наук, –
гл. редактор серии «Технические науки»;
Егоров В.Н., канд. пед. наук, –
гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

Заславская О.В., д-р пед. наук, –
гл. редактор серии «Педагогика»;
Качурин Н.М., д-р техн. наук, –
гл. редактор серии «Науки о Земле»;
Понаморева О.Н., д-р хим. наук, –
гл. редактор серии «Естественные науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).
Заместитель главного редактора
Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь
Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).
Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ
Журин А.В., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Александров А.Ю., д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров);
Баласаян Б.С., д-р техн. наук (Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван, Армения);
Запозель Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, г. Острава, Чехия);
Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, г. Люблин, Польша);
Лавриченко В.Ю., д-р техн. наук, (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);
Ларин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Мельников В.Е., д-р техн. наук (Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва);

Меущерков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет, г. Липецк);
Молжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);
Распатов В.Я., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный технический университет, г. Орел);
Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Сычугов А.А., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Треубов В.И., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ», г. Тула);
Ядин С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

05.02.02 Машинное оборудование системы приводов и детали машин;
05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;
05.02.08 Технология машиностроения;
05.02.09 Технологии и машины обработки давлением;
05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (по отраслям);
05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции;
05.09.03 Электротехнические комплексы и системы;
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);
05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям);
05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

Активация Windows

Чтобы активировать Windows, перейдите на [www.microsoft.com/windows/activation](#).
© Издательство ТулГУ, 2021
компьютера.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.22

DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-159-165

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ ПО КАНАЛУ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ

В.О. Акуличев, В.Ю. Непомнящий, С.Г. Висич, В.М. Степанов,
М.В. Панарин, В.М. Панарин, А.А. Маслова

Рассмотрено построение цифровой математической модели модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу измерения тока утечки, включая модели фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ и фиксации разрядов на изоляторах модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ. Предлагаемая модель реализуется непосредственно на интеллектуальном модуле и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, воздушная линия электропередач, электрический ток, ток короткого замыкания, изолятор, измерение, диспетчерский пункт.

Оценка технического состояния гирлянд изоляторов на обследуемой линии в настоящее время осуществляется на основании сведений о ежегодном потоке отказов подвесных изоляторов, как в поддерживающих, так и в натяжных гирляндах изоляторов. Такие данные должны содержаться в эксплуатационной документации. При отсутствии такой информации необходимо проводить полное обследование состояния изоляции ВЛ на данный момент.

ООО «СервисСофт» совместно с филиалом «Тулэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья» предлагает для оценки технического состояния изоляторов использовать цифровую математическую модель дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу измерения тока утечки.

Мониторинг изоляторов проводится посредством измерения величины токов утечек через изоляторы. Токи утечек замеряются высокочувствительными трансформаторами тока.

Модуль дистанционного мониторинга изоляторов проводит фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов. Данные параметры позволяют провести косвенную оценку состояния изоляторов и принять меры по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций [1-2].

Последовательность мгновенных измеренных значений тока утечки, измеряемых с периодом квантования по времени $T_{\text{кв}}$, запишем в виде

$$i_{\text{ут}}(k), i_{\text{ут}}(k-1), i_{\text{ут}}(k-2), \dots, i_{\text{ут}}(k-N+1), i_{\text{ут}}(k-N), \quad (1)$$

где k – порядок отсчета значений переменных при квантовании с периодом $T_{\text{кв}}$.

159

Значение N определяется соотношением

$$N = \frac{T_{\text{лфт}}}{T_{\text{кв}}}, \quad (2)$$

где N – количество отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени; $T_{\text{лфт}}$ – период передачи данных от модуля интеллектуальной диагностики (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с; $T_{\text{кв}}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с.

В результате последовательность (1) формируется непосредственно в модуле дистанционного мониторинга изоляторов.

Данная последовательность представляет собой набор отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени, длина последовательности составляет N отсчетов.

При построении цифровой модели фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ формируется числовая последовательность вида [3]

$$i_{\text{ут}}(0), i_{\text{ут}}(1), i_{\text{ут}}(2), \dots, i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} - 1), i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} - 2), i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}}), \quad (3)$$

причем $i_{\text{ут}}(0) = 0$, фиксация перехода синусоидального тока через ноль в положительную область; $N_{\text{ТЛС}}$ – количество отсчетов значений тока утечки $i_{\text{ут}}$ на периоде сетевого напряжения

$$N_{\text{ТЛС}} = \frac{T_c}{T_{\text{лфт}}}, \quad (4)$$

где T_c – период сети переменного тока, с; $T_{\text{лфт}}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с.

Фиксацию динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ производим на основе анализа изменения связанных отсчетов тока на соседних периодах сети.

Для этого формируются две последовательности отсчетов тока утечки, сдвинутые на один период.

Последовательность отсчетов тока утечки текущего периода имеет вид

$$i_{\text{ут}}(0), i_{\text{ут}}(1), i_{\text{ут}}(2), \dots, i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} - 1), i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} - 2), i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}}). \quad (5)$$

Последовательность отсчетов тока утечки предыдущего периода приставим в виде

$$i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}}), i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} + 1), i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} + 2), \dots, i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} + 3), \quad (6)$$

Проводим сравнение связанных отсчетов тока утечки на соседних периодах сети

$$K_{\text{ут}}(k) = \frac{i_{\text{ут}}(k)}{i_{\text{ут}}(N_{\text{ТЛС}} + k)} \quad \text{для } k \in (1, N_{\text{ТЛС}}), \quad (7)$$

где $K_{\text{ут}}(k)$ – расчетный коэффициент превышения тока утечки.

Полученный расчетный коэффициент превышения тока утечки сравнивается коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов $K_{\text{утф}}$.

Если

$$K_{\text{ут}}(k) > K_{\text{утф}}, \quad (8)$$

то вырабатывается сигнал фиксации динамики нарастания тока утечки изолятора $K_{\text{утфн}}$ на котором установлен модуль интеллектуальной диагностики изоляторов.

При соблюдении условия (8) модуль интеллектуальной диагностики изоляторов формирует последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов

160

Активация Windows

Чтобы активировать Windows, перейдите на сайт Microsoft.com

$$i_{ут\text{фи}}(0), i_{ут\text{фи}}(1), i_{ут\text{фи}}(2), \dots, i_{ут\text{фи}}(N_{T_{IC}} - 1), \\ i_{ут\text{фи}}(N_{T_{IC}} - 2), i_{ут\text{фи}}(N_{T_{IC}}). \quad (9)$$

где $i_{ут\text{фи}}$ – значения тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов.

Модуль интеллектуальной диагностики изоляторов передает полученную последовательность в диспетчерский пункт электросетевой компании с установленным периодом передачи данных.

В диспетчерском пункте электросетевой компании формируют общую последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов и используют для анализа работы и диагностики изоляторов [4].

Цифровая математическая модель фиксации разрядов на изоляторах модуля дистанционного мониторинга изоляторов разрабатывается на входных данных, представляющих собой последовательность тока утечки на некотором интервале $N = \frac{T_{I_{ут}}}{T_{ут}}$

$$i_{ут}(k), i_{ут}(k - 1), i_{ут}(k - 2), \dots, i_{ут}(k - N + 1), i_{ут}(k - N). \quad (10)$$

Фиксация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

Для фиксации разрядов на изоляторах модуля дистанционного мониторинга изоляторов разрабатывается на входных данных введем пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$.

Если измеренное значение тока утечки $i_{ут}(k)$, ниже порогового значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$, то принимаем, что частичного разряда на изоляторе не произошло.

Условие фиксации разрядов на изоляторах модуля дистанционного мониторинга изоляторов представим в виде неравенства

$$i_{ут}(k) > i_{утп}. \quad (11)$$

При соблюдении данного неравенства модуль дистанционного мониторинга изоляторов принимает решение о проявлении частичного разряда на изоляторе.

Параметры частичного разряда на изоляторе фиксируем через величину превышения тока утечки в абсолютной и относительной величинах, а также длительности частичного разряда и выделяемой мощности каждого частичного разряда [5-6].

Абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда на изоляторе определяется

$$i_{ута}(k) = i_{ут}(k) - i_{утп} \quad (12)$$

где $i_{ута}(k)$ – абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда, А; $i_{ут}(k)$ – измеренное текущее значение тока утечки, А; $i_{утп}$ – пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе, А.

Параметр частичного разряда на изоляторе, характеризующий во сколько раз, возрастает величина тока утечки при частичном разряде, фиксируем как величину относительного превышения тока утечки

$$Ki_{уто}(k) = \frac{i_{ут}(k)}{i_{утп}} \quad (13)$$

где $Ki_{уто}(k)$ – относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе.

Из последовательности $Ki_{уто}(k)$ выделяется максимальная $Ki_{уто\text{max}}$ относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе.

Дополнительно параметр частичного разряда на изоляторе фиксируем через длительность частичного разряда.

Для этого при наступлении события для k отсчета, при котором измеренное значение тока утечки $i_{ут}(k)$ превышает пороговое значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$

$$i_{ут}(k) > i_{утп} \quad (14)$$

Запускаем счетчик количества отсчетов, при которых соблюдается данное условие

$$N_{утп} = N_{утп} + 1 \quad (15)$$

и проверяем

$$i_{ут}(k + 1) > i_{утп}. \quad (16)$$

Затем

$$i_{ут}(k + 2) > i_{утп} \quad (17)$$

и так далее

$$i_{ут}(k + 3) > i_{утп} \quad (18)$$

вплоть до спада тока утечки ниже величины порогового значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$

$$i_{ут}(k + N_{утп}) < i_{утп}. \quad (19)$$

где $N_{утп}$ – количество периодических отсчетов, при которых величина тока утечки превышала пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе.

Длительность частичного разряда на изоляторе фиксируем уравнением

$$T_{утп} = N_{утп} * T_{ут} \quad (20)$$

где $T_{утп}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с.

Величина пропорциональная выделяемой мощности каждого частичного разряда определяется соотношением

$$P_{ут} = \sum_{k=1}^{N_{утп}} U_{и} * i_{ут}(k), \quad (21)$$

где $P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт; $U_{и}$ – напряжение, прикладываемое к изолятору (гирлянде изоляторов), В.

Расчитанные интеллектуальным модулем дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ интегрированные параметры частичного разряда на изоляторе: $Ki_{уто\text{max}}$ – максимальная относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе; $T_{утп}$ – длительность частичного разряда на изоляторе, с; $P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт.

В реальном времени передаются в диспетчерский пункт электросетевой компании с установленным периодом передачи данных $T_{I_{ут}}$.

Принятые в диспетчерском пункте электросетевой компании значения параметров частичных разрядов на изоляторах объединяются на продолжительных интервалах времени.

На основании данных относительных величин превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе, поступивших от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, строится функция максимальных значений на интервале наблюдений электросетевой компании

$$KDi_{уто\text{max}}(m), KDi_{уто\text{max}}(m+1), KDi_{уто\text{max}}(m+2), \\ KDi_{уто\text{max}}(m+3), KDi_{уто\text{max}}(m+M), \quad (22)$$

где $KDi_{уто\text{max}}(m)$ – максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании для m – принятого отсчета от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ; $T_{и}$ – интервал наблюдений электросетевой компании, с; $M = \frac{T_{и}}{T_{I_{ут}}}$ – количество отсчетов (посылок), принятых от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на интервале наблюдений электросетевой компании $T_{и}$.

Переданные от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ и принятые в диспетчерском пункте электросетевой компании значения длительности частичного разряда на изоляторе $T_{утп}$ суммируются на том же интервале наблюдения T_n

$$TD_{утп} = \sum_{m=1}^M T_{утп} \quad (23)$$

где $TD_{утп}$ – суммарная длительность частичного разряда на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании T_n .

Относительная длительность частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании T_n определяется соотношением

$$TD_{утп\ отн} = \frac{1}{T_n} \sum_{m=1}^M T_{утп} \quad (24)$$

Мощность частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании T_n определяется соотношением

$$PD_{ут} = \frac{1}{T_n} \sum_{m=1}^M P_{ут}(m), \quad (25)$$

где $PD_{утп}$ – суммарная мощность частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании T_n ; $P_{ут}$ – мощность каждого частичного разряда; T_n – интервал наблюдения на сервере электросетевой компании, с.

Параметры частичных разрядов на сервере электросетевой компании сравниваются с допустимыми пределами

$$\begin{aligned} KDi_{ут0\ max} &< KDi_{ут0\ max\ доп}, \\ TD_{утп\ отн} &< TD_{утп\ отн\ доп}, \\ PD_{ут} &< PD_{ут\ доп}, \end{aligned} \quad (26)$$

где $KDi_{ут0\ max\ доп}$ – предельно допустимое максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании; $TD_{утп\ отн\ доп}$ – предельно допустимое максимальное значение относительной длительности частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании; $PD_{ут\ доп}$ – предельно допустимое максимальное значение суммарной мощности частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт.

Если полученные неравенства соблюдаются, то сервер электросетевой компании предупреждающих сигналов не вырабатывает. Принимается, что изолятор работает по параметрам частичных разрядов в допустимых пределах.

Если данные неравенства не соблюдаются, что соответствует работе изолятора по параметрам частичных разрядов вне допустимых пределов, то сервер электросетевой компании вырабатывает предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба проверяет состояние указанного изолятора.

Модуль дистанционного мониторинга изоляторов позволяет получить достоверную информацию о темпах и закономерностях снижения прочности и отказах поврежденных изоляторов в период эксплуатации ВЛ.

Выводы. Разработана математическая модель дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу измерения тока утечки. Получены соотношения для оценки динамики нарастания тока утечки изоляторов ВЛ и фиксации частичных разрядов.

Практическая ценность модели состоит в использовании полученных уравнений при реализации системы дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ с использованием модулей дистанционной диагностики, монтируемых непосредственно на проводах, фиксирующих и передающих значения тока утечки, динамики его нарастания и данные частичных разрядов в реальном масштабе времени на сервер электросетевой компании.

Полученные теоретические и практические результаты, модуль дистанционной диагностики проводов находят применение в оперативных службах электросетевых компаний.

Список литературы

1. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. СТО 56947007- 29.240.55.143-2013. ОАО «ФСК ЕЭС». 2013. 42 с.

2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ (Издание седьмое). Приказ Минэнерго России от 20.05.2003 № 187. 109 с.

3. Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Омский научный вестник. 2009. №3(83). С. 171-175.

4. Войтов Д.Н., Попова Е.В. Алгоритм учета температуры провода при расчете поточкораспределения в электрической сети // Электричество. 2010. № 9. С. 24-30.

5. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. WG B2.43, Tech. Rep. 601. CIGRE, 2014. 95 p.

6. Mo Y., Zhou X., Wang Ya., Liang L. Study on operating status of overhead transmission lines based on wind speed variation. Progress In Electromagnetics Research M, 2017. Vol. 60. P. 111–120.

Акуличев Виталий Олегович, первый заместитель генерального директора, директор по развитию, Akulichev.VO@mrsk-1.ru, Россия, Калининград, ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Непомнящий Валерий Юрьевич, первый заместитель директора, главный инженер филиала «Тулэнерго», tulenergo@tl.mrsk-cp.ru, Россия, Тула, ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Висич Сергей Геннадьевич, ведущий инженер, Visich.SG@tl.mrsk-cp.ru, Россия, Тула, ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Степанов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, energy@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

Панарин Михаил Владимирович, канд. техн. наук, директор, pmv@ssoft24.com, Россия, Тула, ООО «СервисСофт Инжиниринг».

Панарин Владимир Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, panarin-tsu@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

Маслова Анна Александровна, д-р техн. наук, доцент, anna_zukova@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MATHEMATICAL MODEL REMOTE MONITORING OF HV-LINE INSULATORS BY LEAKAGE CURRENT MEASUREMENT CHANNEL

V.O. Akulichev, V.Yu. Nepomniachtchi, S.G. Visich, V.M. Stepanov, M.V. Panarin, V.M. Panarin, A.A. Maslova

The construction of a digital mathematical model of the module for remote monitoring of overhead line insulators via the leakage current measurement channel, including models for fixing the dynamics of the increase in the leakage current of insulators of the module for remote monitoring of overhead line insulators and fixing discharges on the insulators of

the remote monitoring module for overhead line insulators. The proposed model is implemented directly on the intelligent module and on the server of the control room of the power grid company.

Key words: remote diagnostics, overhead power line, electric current, short circuit current, insulator, measurement, control room.

Akulichev Vitaly Olegovich, first deputy general director, director for development, Akulichev.VO@mrsk-l.ru, Russia, Kaliningrad, IDGC of Center and Volga Region, PJSC,

Nepomnyashchy Valery Yurievich, first deputy director, chief engineer of the tulenergo branch, tulenergo@tl.mrsk-cp.ru, Russia, Tula, IDGC of Center and Volga Region, PJSC,

Visich Sergey Gennadievich, lead engineer, Visich.SG@tl.mrsk-cp.ru, Russia, Tula, IDGC of Center and Volga Region PJSC,

Stepanov Vladimir Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, energy@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Panarin Mikhail Vladimirovich, candidate of technical sciences, director, pmv@ssoft24.com, Russia, Tula, ServiceSoft Engineering LLC,

Panarin Vladimir Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, panarin-tsu@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Maslova Anna Aleksandrovna, doctor of technical sciences, docent, an-zuykova@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.316.728

DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-165-173

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Я.Э. Шклярский, О.С. Васильков

Рассматривается возможность применения систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) для регулирования графика нагрузки предприятия. Представлен разработанный алгоритм определения мест подключения СНЭЭ в энергосистеме, в основе которого лежит выявленный критерий, позволяющий оценить влияние изменения графика нагрузки в одном узле на энергосистему в целом. Применение данного алгоритма позволит определить место подключения СНЭЭ для максимального снижения потерь электроэнергии в сети.

Ключевые слова: системы накопления электроэнергии, регулирование графика нагрузки, выбор места подключения.

В последнее десятилетие как в мировом, так и в Российском энергетическом секторе началась «накопительная революция». Ее стремительное развитие связано, в первую очередь, с распространением возобновляемых источников электроэнергии, снижением материалоемкости, повышением удельных характеристик, а также с постепенной интеллектуализацией сетей, в которых накопители будут играть одну из ключевых ролей. По последним прогнозам Bloomberg New Energy Finance к 2040 году совокупная установленная мощность систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) превысит

порог в 1000 ГВт [1]. В России, несмотря на замедленную интеграцию ВИЭ, интенсивное развитие технологий накопления электроэнергии [2, 3] уже привело к возможности реализовывать проекты, обладающие не только технической, но и экономической эффективностью [4].

Обычно СНЭЭ состоят из трех основных элементов [5]: подсистемы накопления, подсистемы преобразования и подсистемы распределения. Подсистема накопления комплектуется аккумуляторами электроэнергии и содержит систему мониторинга заряда/разряда. Подсистема преобразования осуществляет преобразования напряжения постоянного тока подсистемы накопления в напряжение переменного и обратно. В подсистеме распределения основным элементом является согласующий трансформатор, содержит коммутационные аппараты. Для обеспечения согласованной работы всех перечисленных систем СНЭЭ дополняется системой управления.

Если переходить к способам применения СНЭЭ, то, условно, их можно разделить на две группы по соотношению энергоемкости ($E_{\text{ном}}$) к мощности ($S_{\text{ном}}$). Классификация способов применения СНЭЭ представлена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация способов применения СНЭЭ

«Мощностное» применение $E_{\text{ном}} / S_{\text{ном}} < 1$	«Энергоемкое» применение $E_{\text{ном}} / S_{\text{ном}} > 1$
Регулирование частоты в ЕЭС России	Регулирование графика нагрузки
Обеспечение качества электроэнергии	Отсрочка инвестиций в модернизацию сетевых объектов
Сглаживание резких изменений мощности	Снижение потерь в сети
Источник бесперебойного питания	Интеграция ВИЭ в энергосистему
Повышение статической и динамической устойчивости	Электроснабжение изолированных территорий
Замещение резерва в автономной системе	Предотвращение перегрузок при авариях

Отличительной чертой накопителей электроэнергии является их многофункциональность, которая позволяет выполнять сразу ряд функций, что, в свою очередь, позитивно сказывается на их инвестиционной привлекательности и является дополнительным драйвером внедрения СНЭЭ в энергосистему [6, 7].

Согласно исследованиям АО «Фонд «Форсайт», в настоящий момент 25% от всех внедряемых СНЭЭ используются для управления нагрузкой потребителя [1]. Одним из основных показателей энергоэффективности систем электроснабжения являются графики электрических нагрузок. Неравномерность графиков нагрузки (ГН) приводит к увеличению потерь при производстве, передаче и потреблении электроэнергии. Также в часы максимальных нагрузок затрачивается гораздо больше ресурсов на выработку электроэнергии, чем в периоды «провалов», а каждый останов и пуск энергоблоков связан с большими непроизводительными затратами, таким образом снижается коэффициент использования установленной мощности электростанций. Поэтому можно сделать вывод, что выравниванием графика нагрузки можно решить сразу несколько задач – повысить КИУМ, снизить потери электроэнергии в сетях, тем самым отсрочить инвестиции в модернизацию системы электроснабжения [8, 9].

При рассмотрении вопроса регулирования графиков нагрузки развивались две теории – смещение пиков потребления и разуплотнение графиков нагрузки. Обе теории строились на использовании на промышленных предприятиях потребителей-регуляторов. Комплекс потребителей – регуляторов мощности предприятия есть совокупность электроприемников, управляемых по единой программе в режиме регулирования нагрузки с целью формирования оптимизированных графиков электрических нагрузок предприятий [10]. В качестве потребителей-регуляторов используется мощное и высокоавтоматизированное оборудование, обеспечивающее существенное снижение

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – Б.С. Яковлев

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 24.05.21. Дата выхода в свет 31.05.21.
Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 80,11
Тираж 500 экз. Заказ 065
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95
