

УДК 621.315.175

EDN: HMUBOH

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ВЛ-10(6) КВ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

С.П. Максимов

ORCID: **0009-0007-9514-6000** e-mail: **zergios-maksimus@yandex.ru**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Саратов, Россия

ООО «НТЦ Инструмент-микро»

Энгельс, Россия

А.В. Ладин

ORCID: **0009-0000-3592-5503** e-mail: **79518889955@yandex.ru**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Саратов, Россия

ООО «Газпром Трансгаз Саратов» Инженерно-технический центр

Саратов, Россия

П.А. Кузнецов

ORCID: **0009-0008-5731-0727** e-mail: **paulsmith07@mail.ru**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Саратов, Россия

ООО «НТЦ Инструмент-микро»

Энгельс, Россия

Рассмотрены способы проведения плавки гололеда на воздушной линии (ВЛ) 10(6) кВ без отключения потребителей. Актуальность обусловлена отсутствием в распределительных сетях способа, обеспечивающего бесперебойность электроснабжения потребителей для всех типов схем сети. Новый способ должен быть управляемым, обеспечивать надежность и качество электроснабжения потребителей на уровне нормального режима сети электроснабжения. Плавка гололеда должна осуществляться током промышленной частоты в результате создания специального режима сети электроснабжения, при котором обеспечивается требуемое для электроснабжения потребителей напряжение и достаточная для плавки гололеда величина тока. Выполнен расчет тока и времени плавки гололеда, рассмотрены способы создания специального режима электроснабжения, произведена оценка их влияния на потребителей и оборудование питающей подстанции на примере ВЛ-10(6) кВ. Установлено, что все рассмотренные способы создают режим, в котором напряжение у потребителя значительно отклоняется как от номинального, так и от напряжения в нормальном режиме. При этом предлагаемый способ подключения источника реактивной мощности к концу ВЛ обеспечивает высокий ток плавки гололеда, увеличение напряжения потребителей и наименьшую загрузку трансформатора питающей подстанции.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, плавка гололеда, распределительная сеть.

Для цитирования: Максимов С.П., Ладин А.В., Кузнецов П.А. Исследования режимов плавки гололеда на ВЛ-10(6) кВ без отключения потребителей // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 2. С. 23-39. EDN: HMUBOH

RESEARCH OF ICE MELTING MODES ON 10(6) kV OVERHEAD POWER LINE WITHOUT LOAD DISCONNECTION

S.P. Maksimov

ORCID: **0009-0007-9514-6000** e-mail: **zergios-maksimus@yandex.ru**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Saratov, Russia

JSC «NTC Instrument-micro»

Engels, Russia

A.V. Ladin

ORCID: **0009-0000-3592-5503** e-mail: **79518889955@yandex.ru**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Saratov, Russia

Engineering and technical center of the Gazprom transgaz Saratov LLC

Saratov, Russia

P.A. Kuznetsov

ORCID: **0009-0008-5731-0727** e-mail: **paulsmith07@mail.ru**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Saratov, Russia

JSC «NTC Instrument-micro»

Engels, Russia

Abstract. The paper presents methods for ice melting on 10(6) kV overhead lines without load disconnection. At the moment, there are no methods for ice melting in distribution networks that ensure uninterrupted power supply to consumers applicable for all types of network schemes. Therefore, the development of a new methods for ice melting on 10(6) kV overhead lines is relevant. The new method must be controllable and ensure the reliability and power quality at the level of the normal mode of the power supply network. Ice melting should be carried out with industrial frequency current as a result of the creation of a special mode of the power supply network, which provides the voltage required for power supply to consumers and a high current sufficient for melting ice. The authors calculated the values of the current and the time of melting ice, considered ways of creating a special mode of power supply and searched their impact on consumers and equipment of the supply substation. It has been determined that all the considered methods

create a mode that increases the consumer voltage significantly above the rated voltage. As a result, it was found that the best method for implementation is the connection of an additional source of reactive power to the end of the overhead line. It provides a high current for ice melting, an increase in voltage for consumers and the lowest load on the transformer of the supply substation.

Keywords: overhead power line, ice and rime deposition, ice melting, distribution networks.

For citation: S.P. Maksimov and P.A. Kuznetsov, “Research of ice melting modes on 10(6) kV overhead power line without load disconnection”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 23-39, 2024. EDN: HMUBOH

I. Введение

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) напряжением 10(6) кВ являются основой распределительных сетей России, а их эксплуатация выступает одной из самых трудозатратных работ для региональных сетевых организаций, особенно в осенне-зимний период. ВЛ подвержены гололедно-ветровым нагрузкам, которые влекут за собой изменение габарита линии, обрывы проводов, разрушение траверс и опор, что приводит к недоотпуску электроэнергии и материальным ущербам. Зачастую неудовлетворительное техническое состояние ВЛ-10(6) кВ, связанное с недостатком их обслуживания и ремонта, длительной (с 1950-70-х гг.) эксплуатацией некоторых линий с, а также высокими гололедно-ветровыми нагрузками, приводит к повышенной аварийности на ВЛ [1]. Обнаружение гололедно-изморозевых отложений является отдельной составляющей при проведении мероприятий по борьбе с гололедообразованием [2]. Одним из наиболее эффективных методов является плавка гололеда [3].

По роду применяемого тока плавки гололеда существуют следующие типы плавки: плавка переменным током промышленной частоты; плавка постоянным током; плавка ВЧ и СВЧ током. Наиболее распространена и применима плавка переменным током промышленной частоты следующими методами: током короткого замыкания, током встречного включения фаз, перераспределением нагрузок [4]. Разработаны способы плавки наложением переменных токов промышленной частоты [5]. В [6] рассмотрены и сравнены между собой электрические способы борьбы с гололедом применительно к ВЛ-10(6) с учетом факторов, характерных для устройства распределительной сети 10(6) кВ. Авторами сформулированы характеристики оптимального метода плавки гололеда переменным током промышленной частоты, которые перекрывают недостатки известных методов.

Целью данной работы является поиск способов осуществления метода плавки с характеристиками, указанными в [6], и анализ их влияния на сеть и потребителя.

II. Общее устройство и режим сети по оптимальному методу плавки гололедно-изморозевых отложений на ВЛ-10(6) кВ

В [6] определено, что ни один из существующих способов плавки гололеда не является наилучшим решением для ВЛ-10(6) кВ. Для известных электрических методов выделены следующие недостатки, которые необходимо исключить:

- отключение потребителя;
- необходимость объезда всех отпаяк ВЛ-10(6) кВ для переключений;
- необходимость переключений на опорных подстанциях (ПС);
- невозможность применения методов в некоторых видах сетей (например, неработоспособность методов перераспределения нагрузки и наложения токов в нерезервированных сетях);
- невозможность достижения требуемого тока плавки и его регулирования (для методов перераспределения нагрузки и наложения токов).

Данные недостатки нивелируются применением нового метода плавки гололеда, который должен отвечать следующим требованиям [6]:

- 1) плавка гололеда без отключения потребителей, обеспечение надежности электроснабжения потребителей в период плавки;
- 2) применимость для всех видов схем сети 10(6) кВ;
- 3) обеспечение качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [7] в режиме плавки;
- 4) автоматизация процесса плавки;
- 5) сокращение времени подготовки к процедуре плавки и перехода в нормальный режим после ее окончания вплоть до времени, необходимого для автоматического переключения оборудования;
- 6) управление режимом сети, т.е. током плавки, напряжением, нагрузкой оборудования;
- 7) поддержание величины тока в проводах ВЛ, достаточной для плавки гололеда;
- 8) применение для ВЛ длиной до 20 км и сечением проводов от 25 до 95 мм².

Проводя анализ данного списка требований, можно увидеть, что они указывают на общее устройство и режим сети в процессе плавки гололеда:

- требования 1, 4 и 5 выполняются, если переключения на трансформаторных подстанциях потребителей не требуются;
- требования 1 и 3 подразумевают обеспечение требуемого уровня напряжения для электроприемников потребителей во время проведения плавки;
- требование 2 подразумевает плавку без отключения потребителей в нерезервируемых разомкнутых сетях, где единственный источник мощности – опорная ПС;

– требования 4 и 6 в отсутствие возможности какого-либо регулирования тока на опорной ПС выполняются при подключении дополнительных устройств к нормальной схеме сети, которые будут определять режим плавки и одновременного электроснабжения потребителей.

Таким образом, чтобы обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителей, характеристики схемы электрической сети при плавке гололеда по оптимальному методу должны совпадать с характеристиками нормальной схемы. Режим электроснабжения и плавки должен обеспечиваться подключением к сети дополнительных устройств. При этом режим сети должен минимально отличаться от нормального режима по напряжению, а по величине тока – обеспечивать одновременное электроснабжение потребителей и плавку гололеда. Ключевым отличием данного режима от нормального является увеличение тока в проводах ВЛ до требуемого тока плавки при сохранении напряжения у потребителей. Для такого режима далее введем термин «специальный режим сети».

III. Определение параметров специального режима сети электроснабжения при плавке гололеда

Приведенное выше условие увеличения тока в проводах ВЛ при обеспечении напряжения у потребителей в рамках ГОСТ означает, что в линии электропередачи увеличивается поток мощности, что и приводит к нарастанию тока. В нормальном режиме поток мощности, протекающий в линию электропередачи от шин подстанции, можно описать как:

$$S = \sqrt{\left(\sum P_{\text{потр.}i} + \sum \Delta P_j\right)^2 + \left(\sum Q_{\text{потр.}i} + \sum \Delta Q_j\right)^2} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ПС}} I_W, \quad (1)$$

где $P_{\text{потр.}i}$ и $Q_{\text{потр.}i}$ – активная и реактивная мощности i -го потребителя на линии; ΔP_j и ΔQ_j – потери активной и реактивной мощности на j -ом участке линии; $U_{\text{ПС}}$ – линейное напряжение на шинах питающей подстанции; I_W – ток в проводе ВЛ (при наличии отпаечных линий – ток на головном участке ВЛ).

В соответствии с (1) для увеличения тока на линии необходимо увеличить мощность, т.е. добавить дополнительные слагаемые в выражение расчета мощности:

$$S' = \sqrt{\left(\sum P_{\text{потр.}i} + \sum \Delta P_j' \pm P'\right)^2 + \left(\sum Q_{\text{потр.}i} + \sum \Delta Q_j' \pm Q'\right)^2} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ПС}} I_W', \quad (2)$$

где P' и Q' – дополнительные активная и реактивная мощности; $\Delta P_j'$ и $\Delta Q_j'$ – потери активной и реактивной мощности на j -ом участке линии при плавке

гололеда ($\Delta P_j' > \Delta P_j$; $\Delta Q_j' > \Delta Q_j$); $I_{W'}$ – ток ВЛ, равный току плавки гололеда.

Возможны следующие способы получения дополнительного потока мощности в линии:

1) подключение к концу линии дополнительной активной нагрузки, увеличивающей поток активной мощности от шин питающей подстанции (P' с положительным знаком);

2) подключение к концу линии дополнительной реактивной нагрузки, увеличивающей поток реактивной мощности от шин питающей подстанции (Q' с положительным знаком);

3) подключение к концу линии источника активной мощности, осуществляющего электроснабжение потребителей и перенаправляющего поток активной мощности из ВЛ в шины питающей подстанции (P' с отрицательным знаком);

4) подключение к концу линии источника реактивной мощности, осуществляющего питание реактивной нагрузки потребителей и перенаправляющего поток реактивной мощности из ВЛ в шины питающей подстанции (Q' с отрицательным знаком).

Рассмотрим влияние данных способов получения дополнительного потока мощности в линии с помощью модели участка сети электроснабжения напряжением 10 кВ. Схема участка представлена на рис. 1.

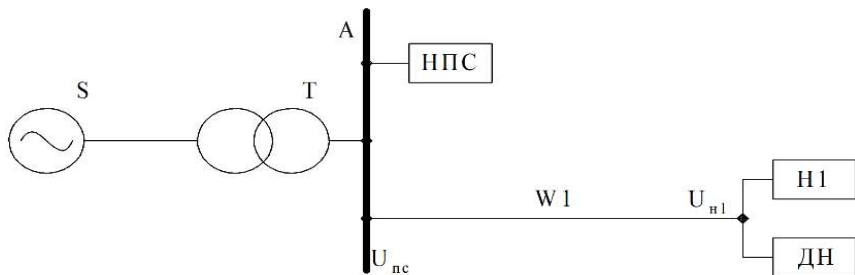


Рис. 1. Схема моделируемого участка сети

Fig.1. Scheme of the simulated network section

В рассматриваемой модели представлены следующие элементы:

- система S: сопротивление $X_S = 13,9$ Ом, напряжение $U_S = 115$ кВ;
- трансформатор питающей подстанции Т, представленный моделью ТДН-10000/110;
- нерезервированная разомкнутая ВЛ-10 кВ W1, выполненная проводом АС-70/11 длиной 13 км на промежуточных опорах типа П10-1;
- нагрузка Н1 линии W1 номинальной мощностью $P_{H1} = 1,15$ МВт, $Q_{H1} = 0,86$ МВАр при номинальном напряжении;

– прочая нагрузка подстанции НПС $P_{НПС} = 3,66$ МВт, $Q_{НП} = 2,76$ МВАр;

– дополнительная нагрузка ДН или источник мощности для повышения тока.

В качестве допущений примем, что температура воздуха -5 °С, скорость ветра 5 м/с, стенка гололеда 1,2 см. Согласно методике расчета тока и времени плавки гололеда [8], для плавки гололеда на рассматриваемой ВЛ $W1$ требуется создать ток 329 А на протяжении 49 мин.

Определим требуемый для плавки поток мощности по проводам ВЛ с учетом стандартного напряжения на шинах подстанции ($U_{ПС} = 10,5$ кВ) $S' = 5976$ кВА. При мощности нагрузки без учета потерь в ВЛ $S_{НП} = 1436$ кВА требуется увеличение потока мощности на 4540 кВА.

В ходе работы произведено моделирование пяти вариантов режима:

- 0) нормальный режим;
- 1) с подключенной дополнительной активной нагрузкой;
- 2) с подключенной дополнительной реактивной нагрузкой;
- 3) с подключенным дополнительным источником активной мощности;
- 4) с подключенным дополнительным источником реактивной мощности.

Моделирование производилось в программной среде MATLAB Simulink, схема модели представлена на рис. 2.

IV. Результаты

Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Моделирование режимов сети при плавке гололеда

Table 1.
Simulation of network modes during ice melting

№ режима	0	1	2	3	4
$P'(Q')$, МВт (МВАр)	0	3,25 МВт	3,3 Мвар	-8,7 МВт	-8,15 Мвар
I_{W1} , А	78,5	333	333	333	332
$U_{ПС}$, кВ	10,4	10,2	9,8	10,2	11,1
$\Delta U_{ПС}$, %	4,2	1,9	-1,9	2	11,7
$U_{НП}$, кВ	9,4	6,5	6,3	12,3	12,3
$\Delta U_{НП}$, %	-5,6	-35	-37	23	23
$\Delta U_{НП}$, %	-	-30,9	-33	30,9	30,9
k_3 , %	69,4	114,9	110,4	64,5	83,5

В процессе моделирования произведен расчет коэффициента загрузки трансформатора k_3 . Также введен показатель отклонения напряжения потребителя при плавке гололеда $U_{НП.пл}$ от напряжения потребителя в нормальном режиме $U_{НП.норм}$:

- наименьшее отклонение от номинального напряжения потребителя создает способ № 3 и 4 (дополнительные источники активной и реактивной мощности);
- все способы отклоняют напряжение потребителя от нормального режима на более чем 30 % и приводят к нарушению требований ГОСТ [7];
- при плавке по способу № 3 наблюдается наименьший коэффициент загрузки трансформатора питающей подстанции при плавке.

В. Дискуссия

Процесс плавки гололеда изменяет режим электроснабжения потребителей и режим работы электрооборудования сети, а именно следующие параметры:

- напряжение у потребителя на ВЛ, по которой производится плавка гололеда;
- напряжение на шинах питающей подстанции;
- загрузку трансформатора питающей подстанции.

Характер влияния плавки на режим определяется выбором способа создания дополнительного потока мощности для увеличения тока. Произведенное моделирование позволяет определить данный характер. Основными показателями при этом являются отклонение напряжения по ГОСТ [7], отклонение напряжения от напряжения при нормальном режиме электроснабжения и коэффициент загрузки силового трансформатора ПС.

Анализ итогов моделирования показывает, что использование любых способов увеличения потока мощности отклоняет напряжение потребителя от нормального напряжения на равную величину. Это связано с одинаковым во всех способах падением напряжения в проводах ВЛ от одинакового тока плавки при неизменном комплексном сопротивлении ВЛ:

$$\dot{U}_{\text{ПС}} - \dot{U}_{\text{Н1}} = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\text{В1}} \cdot \underline{Z}_{\text{В1}} = \Delta U_{\text{В1}} + j\delta U_{\text{В1}}, \quad (4)$$

где $\underline{Z}_{\text{В1}}$ – комплексное сопротивление ВЛ.

Знак отклонения определяется направлением потока мощности, а, следовательно, способом его создания: напряжение возрастает при подключении источников мощности и падает при подключении дополнительных нагрузок. Так, напряжение нагрузок:

$$\dot{U}_{\text{Н1}} = \dot{U}_{\text{ПС}} - \Delta U_{\text{В1}} - j\delta U_{\text{В1}}. \quad (5)$$

Векторные диаграммы напряжения и тока ВЛ на рис. 3 иллюстрируют влияние изменения величины и направления потока мощности в линии электропередачи. Векторные величины напряжений и токов ВЛ приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Падение напряжения при плавке гололеда

Table 2.
Voltage losses during ice melting

№ режима	0	1	2	3	4
I_{W1}, A	77,1-j14,3	332,6+j26,2	254,7-j215,2	-165,9-j289,7	53,1+j327,9
$U_{\text{Пс.фл}}, \text{кВ}$	5,37+j2,68	5,4+j2,35	5,09+j2,47	5,04+j3,04	5,84+j2,67
$\Delta U_{W1} + j\delta U_{W1}, \text{кВ}$	0,49+j0,28	1,7+j1,69	2,39+j0	0,43-j2,36	-1,23+j2,04
$U_{\text{Пл.фл}}, \text{кВ}$	4,88+j2,4	3,7+j0,66	2,7+j2,47	4,61+j5,4	7,07+j0,63

Способы увеличения потока мощности по-разному влияют на напряжение на шинах подстанции. Наименьшее влияние оказывает активная нагрузка, снижая напряжение на 2 % от напряжения в нормальном режиме. Реактивная нагрузка снижает напряжение на шинах на 5,7 %. Источник активной мощности снижает напряжение на 2 %. Источник реактивной мощности увеличивает напряжение на 6,7 %. Это приводит к следующим эффектам:

- уменьшение напряжения на шинах ПС при сохранении настроек устройств ПБВ на трансформаторах ТП-10(6)/0,4 кВ приведет к снижению напряжения у других потребителей ПС на величину больше допустимой по условиям устойчивости к изменениям напряжения, которое зачастую составляет $\pm 5 \dots 10$ % в зависимости от категории нагрузки; особенно характерно для потребителей, подключенных по ВЛ с высоким сопротивлением, в зимний период из-за возрастания нагрузки;
- увеличение напряжения на шинах ПС улучшает качество электроэнергии удаленных потребителей, приводит к уменьшению величины потребляемого ими тока за счет увеличения электромагнитного момента асинхронных электродвигателей; для электрически близких электроприемников увеличение напряжения приводит к чрезмерной нагрузке на изоляцию и ведет к уменьшению срока службы нерегулируемых резистивных элементов из-за их перегрева [9].

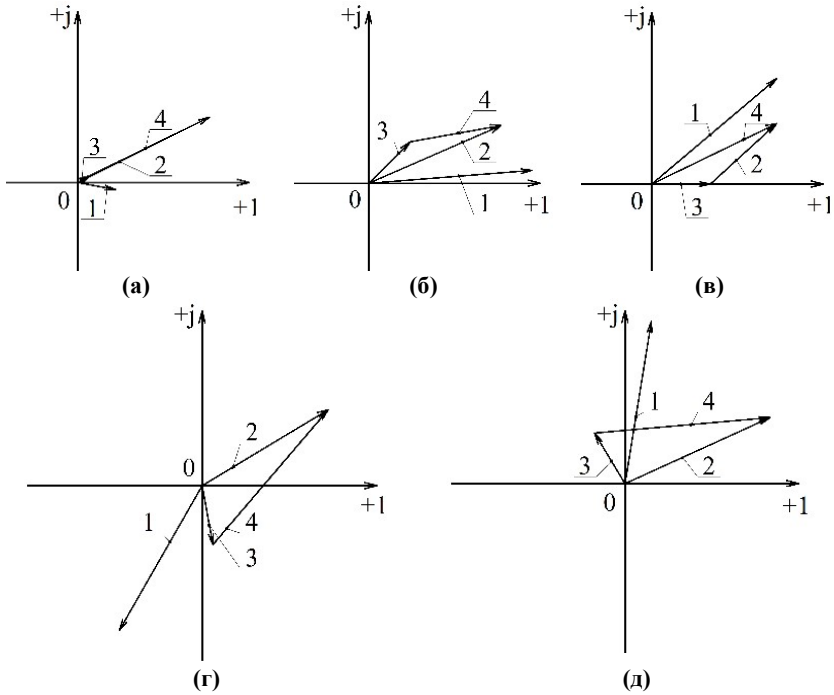


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений и токов ВЛ: режимы № 0 (а), № 1 (б), №2 (в), №3 (г), №4 (д)

1 – ток I_{W1} , 2 – фазное напряжение на шинах ПС $U_{ПС.фA}$,
3 – падение напряжения $\Delta U_{W1} + j\delta U_{W1}$, 4 – напряжение потребителя $U_{Н1.фA}$

Fig. 3. Phasor diagrams of voltages and currents of overhead power line: modes № 0 (a), № 1 (б), №2 (в), №3 (г), №4 (д)

1 – current vector I_{W1} , 2 – substation voltage $U_{ПС.фA}$,
3 – voltage losses $\Delta U_{W1} + j\delta U_{W1}$, 4 – consumer voltage $U_{Н1.фA}$

Наибольшие отличия при сравнении способов создания дополнительной мощности проявляются в изменении загрузки трансформатора. При подключении дополнительных активной и реактивной нагрузок наблюдается увеличение загрузки трансформатора на 46 и 41 % соответственно. Это происходит из-за увеличения потока мощности через трансформатор в направлении дополнительной нагрузки. Так, применяя (2) поток мощности через трансформатор при использовании дополнительной активной нагрузки:

$$S_{\text{тр}}' = \sqrt{\left(P_{\text{Н1}} + P_{\text{НПС}} + P' + \Delta P_{\text{W1}}'\right)^2 + \left(Q_{\text{Н1}} + Q_{\text{НПС}} + \Delta Q_{\text{W1}}'\right)^2}. \quad (6)$$

При использовании дополнительной реактивной нагрузки:

$$S_{\text{тр}}' = \sqrt{\left(P_{\text{Н1}} + P_{\text{НПС}} + \Delta P_{\text{W1}}'\right)^2 + \left(Q_{\text{Н1}} + Q_{\text{НПС}} + Q' + \Delta Q_{\text{W1}}'\right)^2}. \quad (7)$$

При подключении источника активной мощности нагрузка трансформатора ПС снижается по сравнению с нормальным режимом на 4,9 %. Поток мощности через трансформатор ПС при таком способе плавки:

$$S_{\text{тр}}' = \sqrt{\left(P_{\text{Н1}} + P_{\text{НПС}} - P' + \Delta P_{\text{W1}}'\right)^2 + \left(Q_{\text{Н1}} + Q_{\text{НПС}} + \Delta Q_{\text{W1}}'\right)^2}. \quad (8)$$

Для создания высокого потока активной мощности из конца ВЛ в ее начало мощность дополнительного источника должна быть больше активной мощности потребителей на ВЛ и потерь в проводах ВЛ при плавке, т.е.:

$$P' > P_{\text{Н1}} + \Delta P_{\text{W1}}'. \quad (9)$$

Поток активной мощности P'' , поступающий из ВЛ в шины ПС:

$$P'' = P' - P_{\text{Н1}} - \Delta P_{\text{W1}}'. \quad (10)$$

Соответственно поток мощности через трансформатор:

$$S_{\text{тр}}' = \sqrt{\left(P_{\text{НПС}} - P''\right)^2 + \left(Q_{\text{Н1}} + Q_{\text{НПС}} + \Delta Q_{\text{W1}}'\right)^2}. \quad (11)$$

В рассмотренном примере величина потока мощности P'' такая, что нагрузка трансформатора ПС становится меньше, чем в нормальном режиме. При подключении источника реактивной мощности нагрузка трансформатора увеличивается на 14,1 %.

Поток мощности через трансформатор ПС при таком способе плавки:

$$S_{\text{тр}}' = \sqrt{\left(P_{\text{Н1}} + P_{\text{НПС}} + \Delta P_{\text{W1}}'\right)^2 + \left(Q_{\text{Н1}} + Q_{\text{НПС}} - Q' + \Delta Q_{\text{W1}}'\right)^2}. \quad (12)$$

Аналогично способу с подключением дополнительного источника

активной мощности:

$$Q' > Q_{\text{Н1}} + \Delta Q_{\text{W1}}' . \quad (13)$$

Поток реактивной мощности Q'' , поступающий из ВЛ в шины ПС:

$$Q'' = Q' - Q_{\text{Н1}} - \Delta Q_{\text{W1}}' . \quad (14)$$

Поток мощности через трансформатор ПС при таком способе плавки:

$$S_{\text{тп}}' = \sqrt{\left(P_{\text{Н1}} + P_{\text{НПС}} + \Delta P_{\text{W1}}'\right)^2 + \left(Q_{\text{НПС}} - Q''\right)^2} . \quad (15)$$

Сравнивая способы создания дополнительных потоков мощности с помощью источников, видна разница в загрузке трансформатора ПС. Она зависит от коэффициента мощности потребителя на ВЛ $\cos\varphi_{\text{Н1}}$ и соотношения комплексного сопротивления ВЛ $R_{\text{W1}}/X_{\text{W1}}$. При $\cos\varphi_{\text{Н1}} > 0,707$ преобладает активная нагрузка $P_{\text{Н1}}$. При плавке она полностью снабжается от дополнительного источника активной мощности на конце ВЛ, при этом нагрузка трансформатора ПС снижается на величину $P_{\text{Н1}}$. Реактивная нагрузка $Q_{\text{Н1}}$ при $\cos\varphi_{\text{Н1}} > 0,707$ численно меньше чем $P_{\text{Н1}}$. Соответственно, при использовании источника реактивной мощности компенсация реактивной нагрузки $Q_{\text{Н1}}$ снижает нагрузку трансформатора ПС в меньшей степени, так как $P_{\text{Н1}} > Q_{\text{Н1}}$.

Соотношение комплексного сопротивления ВЛ $R_{\text{W1}}/X_{\text{W1}}$ влияет следующим образом: при $R_{\text{W1}}/X_{\text{W1}} > 1$ активное сопротивление ВЛ преобладает, следовательно, потери активной мощности при плавке гололеда:

$$\Delta P_{\text{W1}}' = I_{\text{W1}}^2 \cdot R_{\text{W1}} , \quad (16)$$

численно больше, чем потери реактивной мощности:

$$\Delta Q_{\text{W1}}' = I_{\text{W1}}^2 \cdot X_{\text{W1}} . \quad (17)$$

Для ВЛ-10(6) кВ соотношение $R_{\text{W1}}/X_{\text{W1}}$ для ряда сечений от 25 до 70 мм² всегда больше 1 за счет конструкции ВЛ и, соответственно, меньшего реактивного сопротивления. При плавке с применением дополнительного источника активной мощности активные потери в ВЛ являются нагрузкой для дополнительного источника, а нагрузка трансформатора ПС будет уменьшаться на величину этих потерь. При применении дополнительного источника реактивной мощности нагрузка трансформатора ПС также будет

уменьшаться, но в меньшей степени, так как $\Delta P_{\text{л1}}' > \Delta Q_{\text{л1}}'$.

При плавке гололеда допустима 1,5-кратная перегрузка трансформаторов с системой охлаждения М и Д при $t = 0$ □ на протяжении 2 часов [10]. Следовательно, при подключении дополнительных источников мощности обеспечивается наибольший запас по перегрузке чем при подключении дополнительных нагрузок, что позволяет осуществлять параллельную плавку гололеда на нескольких линиях, подключенных к одному трансформатору.

При сравнении способов создания дополнительной мощности по их природе выделяется дополнительный источник активной мощности, который является активным элементом цепи. Остальные способы можно реализовать на пассивных элементах, при этом активная мощность для проведения плавки гололеда поступает из мощной энергосистемы. Применение активного элемента означает, что для проведения плавки гололеда с применением источника активной мощности требуются затраты топлива. При реализации данного способа на рассматриваемом примере и вырабатываемой мощности 8,7 МВт применяется комплекс из десяти дизель-генераторов суммарной мощностью 10 МВт. Затраты топлива при плавке при номинальном расходе топлива 198 л/ч для каждого агрегата составят 1617 л дизельного топлива. Все эти детали делают данный способ технически сложным, дорогостоящим и требующим расхода топлива, по сравнению с другими способами, при использовании которых не потребляется топливо и которые можно осуществить с помощью технически менее сложных устройств – статических компенсаторов, нагревательных устройств, реакторов.

Оценка влияния способов создания дополнительной мощности на режим электроснабжения по напряжению у потребителя, напряжению на шинах подстанции и загрузке оборудования подстанции показывает, что ни один из рассмотренных способов не отвечает требованиям, установленным авторами к оптимальному способу плавки гололеда без отключения потребителя. Наиболее близким по характеристикам способом, имеющим перспективы дальнейшего исследования, является использование дополнительного источника реактивной мощности для увеличения тока в проводах ВЛ по следующим причинам:

- 1) увеличение напряжения на шинах ПС положительно сказывается на других удаленных потребителях опорной ПС;
- 2) загрузка трансформатора опорной ПС значительно меньше в сравнении со способами, где задействованы дополнительные нагрузки;
- 3) источник реактивной мощности можно выполнить, применяя элементную базу из пассивных элементов, без затрат на топливо, в отличие от применения дополнительного источника активной мощности.

Также в дальнейшем потребуются оценить следующие перспективы внедрения дополнительного источника реактивной мощности для плавки

гололеда в электросетевые организации.

1. *Исполнение установки плавки гололеда*: стационарное исполнение для ВЛ с высокой частотой появления гололедно-изморозевых отложений или мобильное исполнение установки для совершения поочередной плавки на группе ВЛ. Исполнение может варьироваться для разных ВЛ в зависимости от частоты появления гололеда на этих ВЛ.

2. *Подключение данной установки плавки гололеда*: возможные монтажные схемы, выбор электрических коммутационных аппаратов, а также релейной защиты и автоматики. За основу для разработки условий подключения можно использовать существующие технические решения установок компенсации реактивной мощности напряжением 10(6) кВ с учетом условий эксплуатации на ВЛ в осенне-зимний период и выбранного исполнения установки;

3. *Оценка количества и номинальной мощности подобных установок*, требуемых для успешной плавки гололеда на ВЛ в сетевых районах существующих электросетевых организаций.

VI. Заключение

В данной статье поставлена цель рассмотреть способы осуществления оптимального метода плавки током промышленной частоты. Рассмотрены такие способы как: дополнительная активная нагрузка, дополнительная реактивная нагрузка, дополнительный источник активной мощности и дополнительный источник реактивной мощности.

Для проведения анализа данных способов проведено моделирование режима плавки гололеда на участке сети напряжением 10(6) кВ.

На основании моделирования произведен сравнительный анализ данных способов создания дополнительного потока мощности в части их влияния на режим электроснабжения потребителей. Установлено, что по своему влиянию на режим и по своей физической природе наилучшим является способ с подключением дополнительного источника реактивной мощности.

© Максимов С.П., 2024

© Ладин А.В., 2024

© Кузнецов П.А., 2024

Поступила в редакцию 20.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Received 20.12.2023

Accepted 29.01.2024

Библиографический список

- [1] Кабашов В.Ю. Исследование причин аварийных отключений сельских ВЛ 6-10 кВ // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2017. № 04-3/2017. С. 70-73.
- [2] Башкевич В.Я., Угаров Г.Г., Кузнецов П.А., Стебеньков С.Б. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеорологических условиях. Саратов: СГТУ, 2013. – 244 с.
- [3] ГОСТ Р 59965-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электрические сети. Системы плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи. Выбор и обоснование принципиальных технических решений. Введ. 2022-03-01. М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 109 с.
- [4] Барг И.Г., Валк Х.Я., Комаров Д.Т. Совершенствование обслуживания электросетей 0,4-20 кВ в сельской местности. М.: Энергия, 1980. – 240 с.
- [5] Елизарьев А.Ю., Валеев А.Р. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 59-65.
- [6] Максимов С.П., Кузнецов П.А. Анализ существующих методов плавки гололедно-изморозевых отложений на проводах ВЛ-10(6) кВ // Вопросы электротехнологии. 2023. № 1 (38). С. 47-56.
- [7] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [8] Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. М.: МЭИ, 2007. – 448 с.
- [9] Сампер А., Баггини А. Эффективность использования электроэнергии: технологии и сферы применения. Москва: Техносфера, 2020. – 488 с.
- [10] Рудакова Р.М., Вавилова И.В., Голубков И.Е. Методы борьбы с гололедом в электрических сетях энергосистем. Уфа: УГАТУ, 2005. – 187 с.

References

- [1] V. U. Kabashov, "Research of the causes of emergency shutdowns of rural 6-10 kV voltage overhead lines", *International scientific journal "Innovative Science"*, no.04-3/2017, pp. 70-73, 2017 (in Russian).
- [2] V. Y. Bashkevich, G. G. Ugarov, P. A. Kuznetsov and S. B. Stebenkov, *Monitoring of overhead power lines that operate in extreme weather conditions [Monitoring vozduzhnykh linij elektroperehadachi, ekspluatiruemykh v ekstremal'nykh meteoulovnyah]*, Saratov: SSTU, 2013 (in Russian).
- [3] United power system and isolated power systems. Electrical networks. Ice-melting systems on conductors and ground-wire cable of the overhead transmission line. The choice and basis of principal technical solutions, GOST R 59965-2021, March 2022.
- [4] I.G. Barg, H.Y. Valk and D.T. Komarov, *Improving the maintenance of 0.4-20 kV voltage power networks in rural areas [Sovershenstvovanie obsluzhivaniya elektrosetej 0,4-20 kV v sel'skoj mestnosti]*, Moscow: Energia, 1980 (in Russian).

- [5] A.Yu. Elizariiev and A.R. Valeev. "Ice melting on over-head transmissions lines without customers disconnect", *Vestnik UGATU*, vol. 19, no.4 (70), pp. 59-65, 2015.
- [6] S.P. Maksimov and P.A. Kuznetsov, "Existing methods for melting ice and snow accretion on 10(6) kV power lines", *Journal of Electrotechnics*, no.1 (38), pp. 47-56, Mar. 2023.
- [7] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [8] I.I. Levchenko, A.S. Zasyppkin, A.A. Alliluev and E.I. Satsuk, *Diagnostics, reconstruction and operation of overhead power lines in icy areas [Diagnostika, rekonstrukciya i ekspluatatsiya vozdushnyh linij elektroperedachi v gololednyh rajonah]*, Moscow: MPEI, 2007 (in Russian).
- [9] A. Samper and A. Baggini, *Electrical energy efficiency: technologies and applications [Effektivnost' ispol'zovaniya elektroenergii: tekhnologii i sfery primeneniya]*, Moscow: Tekhnosfera, 2020 (in Russian).
- [10] R.M. Rudakova, I.V. Vavilova and I.E. Golubkov, *Methods of dealing with ice in electrical networks of power systems [Metody bor'by s gololedom v elektricheskikh setyah energosistem]*, Ufa: UGATU, 2005 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Максимов Сергей Петрович, аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация.; инженер-проектировщик ООО «НТЦ Инструмент-микро», г. Энгельс, Российская Федерация.

Sergey P. Maksimov, postgraduate student of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation; project engineer of the JSC «NTC Instrument-micro», Engels, Russian Federation.

Ладин Александр Владимирович, магистрант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.; инженер-энергетик Инженерно-технического центра ООО «Газпром Трансгаз Саратов», г. Саратов, Российская Федерация.

Aleksandr V. Ladin, master of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; power engineer of the Engineering and technical center of the Gazprom transgaz Saratov LLC, Saratov, Russian Federation.

Кузнецов Павел Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация; технический директор ООО «НТЦ Инструмент-микро», г. Энгельс, Российская Федерация.

Pavel A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation.; technical director of the JSC «NTC Instrument-micro», Engels, Russian Federation.