

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.31

Игорь Юрьевич Иванов

Филиал АО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана, кандидат технических наук, главный специалист службы релейной защиты и автоматики, Россия, Казань, e-mail: igorivanov85@list.ru

Виталий Викторович Новокрещенов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Казань, e-mail: vitnov@inbox.ru

Вилия Равильевна Иванова

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Казань, e-mail: vr-10@mail.ru

Моделирование участка электрической сети с устройством продольной компенсации для исследования параметров, влияющих на чувствительность дифференциальной защиты

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из путей увеличения пропускной способности ЛЭП является установка устройств продольной компенсации. Однако у данного технического решения, помимо плюсов, имеются и минусы: возникновение инверсии тока во время короткого замыкания; возникновение инверсии напряжения во время короткого замыкания; появление низкочастотных колебаний (например, после отключения короткого замыкания, вследствие изменения параметров режима, вследствие подсинхронного резонанса и т.д.). Все эти явления оказывают влияние на устройства релейной защиты. Существующие решения адаптации алгоритмов функционирования релейной защиты продольно компенсированных ЛЭП в основном направлены на совершенствование алгоритмов функционирования дистанционной защиты. При этом нерешенной остается проблема функционирования дифференциальной защиты линии, связанная с недостаточной чувствительностью данной защиты при коротком замыкании на ЛЭП в режиме повышенной компенсации. В связи с отсутствием в открытой печати сведений по созданию моделей, позволяющих количественно оценить влияние устройств продольной компенсации на чувствительность дифференциальной защиты ЛЭП с продольной компенсацией, целесообразным является разработка модели участка электрической сети с устройством продольной компенсации для исследования параметров, влияющих на чувствительность дифференциальной защиты.

Материалы и методы. Ввиду прикладного характера исследования в качестве объекта изучения выбрана воздушная линия электропередач Ухта–Микунь напряжением 220 кВ, на которой планируется установка устройств продольной компенсации. По причине отсутствия опубликованных работ с описанием математической модели

данной ЛЭП для решения поставленных задач в целях исследования процессов на ЛЭП с устройствами продольной компенсации и построения комплекса релейной защиты принято решение в программе для ПК PSCAD разработать компьютерную модель.

Результаты. Разработана компьютерная модель воздушной линии электропередачи Ухта–Микунь напряжением 220 кВ. Выявлены параметры, влияющие на чувствительность дифференциальной защиты ЛЭП с продольной компенсацией в переходном и установившемся режимах короткого замыкания. Установлено, что одним из таких параметров является переходное сопротивление в месте короткого замыкания. Наиболее подробно рассмотрена специфика влияния короткого замыкания на чувствительность дифференциальной защиты. Проведена верификация разработанной модели и доказана ее адекватность.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы при решении задач повышения устойчивости функционирования дифференциальной защиты на ЛЭП с устройствами продольной компенсации, а также при проведении дополнительных исследований с помощью разработанной модели.

Ключевые слова: устройство продольной компенсации, компьютерная модель дифференциальной защиты линии, активно-адаптивная сеть, релейная защита линии электропередачи, короткое замыкание

Igor Yurievich Ivanov

Branch of JSC “SO UES” of Regional Dispatch Control of Tatarstan, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Chief Specialist of Relay Protection and Automation Service (RPAS), Russia, Kazan, e-mail: igorivanov85@list.ru

Vitaly Viktorovich Novokreshchenov

Kazan State Power Engineering University, Senior Lecturer of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Kazan, e-mail: vitnov@inbox.ru

Viliya Ravilievna Ivanova

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Kazan, e-mail: vr-10@mail.ru

Modeling a section of an electrical network with a series compensation device to study the parameters affecting the sensitivity of differential protection

Abstract

Background. One of the ways to enhance the transmission capacity of power transmission lines is to install series compensation devices (SCD). However, this technical solution has its advantages as well as disadvantages. These include current inversion during a short circuit (SC), voltage inversion during a SC, low-frequency oscillations (for example, after short-circuit clearing due to a change of the mode parameters due to subsynchronous resonance, etc.). All these phenomena impact on relay protection devices. Existing solutions to adapt the algorithms for relay protection operation of series-compensated power transmission lines are mainly aimed at improving the algorithms for distance protection operation. At the same time, the problem of differential protection operation of the line remains unresolved due to the insufficient sensitivity of this protection during a short circuit on the power transmission line in the high compensation mode. Due to the lack of information in public sources on developing models that allow quantitatively assessing the effect of the series compensation devices on the sensitivity of differential protection of power transmission lines with series compensation, it is advisable to develop a model of a section of an electric network with a series compensation device to study the parameters that affect the sensitivity of differential protection.

Materials and methods. Due to the applied nature of the study, the authors have focused on the Ukhta-Mikun 220 kV overhead power transmission line, where the installation of series compensation devices is planned. Due to the lack of published works describing the mathematical model of this transmission line, to solve the set tasks it is decided to develop a computer model in the PSCAD PC program to study the processes on the transmission line with the SCD and develop a relay protection complex.

Results. A computer model of the Ukhta-Mikun overhead power line with a voltage of 220 kV has been developed. The parameters influencing the sensitivity of differential protection of power transmission lines with series compensation in transient and steady-state short-circuit modes have been identified. It has been established that one of such parameters is the transition resistance at the point of short circuit. The specific character of the influence of a short circuit on the sensitivity of differential protection have been examined in detail. The developed model has been verified and its adequacy has been proven.

Conclusions. The results of the study can be used to address problems of increasing the stability of differential protection on power transmission lines with series compensation devices, as well as to conduct additional research using the developed model.

Key words: series compensation device, computer model of line differential protection, active-adaptive network, relay protection of power transmission line, short circuit

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.057-065

Состояние вопроса. В соответствии с концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС), одним из направлений повышения эффективности функционирования электрических сетей в ЕЭС России является насыщение сети активными элементами на базе силовой электроники, позволяющими изменять параметры сети (напряжение по модулю и по фазе, мощность реактивную и активную, сопротивление элементов сети и др.).

Несмотря на значительное многообразие технологий управляемых систем электропередачи переменного тока (FACTS-технологии), применяемых в зарубежных странах, в энергосистеме России, ввиду большой протяженности электрических сетей, наиболее востребованной является FACTS-технология с использованием устройств продольной компенсации (УПК) [1]. Установка на линиях электропередачи УПК позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП за счет компенсации индуктивного сопротивления, повысить статическую и динамическую устойчивость энергосистемы за счет демпфирования электромеханических колебаний (в случае применения управляемого УПК), при этом появляется возможность управления потоками активной мощности нескольких параллельных ЛЭП (в случае применения управляемого УПК хотя бы на одной из линий). УПК значительно повышают эффективность работы электроэнергетической системы, однако их применение невозможно без проработки вопросов адаптации алгоритмов функционирования защиты продольно компенсированных ЛЭП, связанных с переменным характером параметров защищаемого объекта.

Во-первых, при оснащении сетей УПК с широкими возможностями регулирования параметров изменяются условия, в которых функционируют защиты при коротких замыканиях (КЗ), что может приводить к неправильной работе различных защит ЛЭП. Например, токовые защиты ЛЭП могут излишне срабатывать при КЗ на смежном участке сети, так как удаленное КЗ, возникшее на смежном участке, воспринимается защитой как близкое КЗ, расположенное на защищаемой ЛЭП.

Во-вторых, за счет изменения дифференциальных уравнений (появляется дополнительная переменная, символизирующая электрическое сопротивление УПК), описывающих работу электрической сети при КЗ на ЛЭП с УПК, при степени компенсации реактивного сопротивления ЛЭП более 50 % начинают проявляться такие явления, как возникновение инверсии тока и напряжения, низкочастотные колебания при КЗ, которые могут приводить к нарушению селективности и чувствительности различных защит ЛЭП. Так, наличие УПК на ЛЭП весьма существенно влияет на поведение

дистанционных защит, искажая величину и знак измеряемого сопротивления, что приводит к неправильным действиям этих защит. При установке на ЛЭП УПК также значительно усложняется работа дифференциальных защит ЛЭП [2, 3], так как ток КЗ в перекомпенсированном участке получается опережающим, а на противоположном конце поврежденной ЛЭП – отстающим, что приводит к отказу дифференциальной защиты ЛЭП из-за недостаточной чувствительности [1, 4, 5].

В силу описанных выше проблем степень компенсации продольного сопротивления ЛЭП, как правило, составляет не более 50 %.

Существующие решения по адаптации алгоритмов функционирования релейной защиты продольно компенсированных ЛЭП в основном направлены на совершенствование алгоритмов функционирования дистанционной защиты. При этом нерешенной остается проблема функционирования дифференциальной защиты линии (ДЗЛ), связанная с недостаточной чувствительностью данной защиты при КЗ на ЛЭП в режиме повышенной компенсации.

В связи с отсутствием в открытой печати сведений по созданию моделей, позволяющих количественно оценить влияние УПК на чувствительность дифференциальной защиты ЛЭП с продольной компенсацией, целесообразным является разработка модели участка электрической сети с устройством продольной компенсации для исследования параметров, влияющих на чувствительность дифференциальной защиты.

Материалы и методы. Ввиду прикладного характера исследования для изучения была выбрана воздушная линия электропередачи Ухта–Микунь напряжением 220 кВ, на которой, по заверению официальных источников¹, планируется установка устройств продольной компенсации. По причине отсутствия опубликованных работ с описанием математической модели данной ЛЭП для решения поставленных задач было принято решение для исследования процессов на ЛЭП с УПК и построения комплекса релейной защиты в программе для ПК PSCAD разработать компьютерную модель (рис. 1) электротехнической системы, электрическая схема которой представлена на рис. 2. Структурная схема компьютерной модели ДЗЛ представлена на рис. 3.

¹ Информация размещена на официальном сайте публичного акционерного общества «Россети» (ПАО «Россети»): URL: <https://www.rosseti.ru/suppliers/scientific-and-technical-development/intelligent-network/>

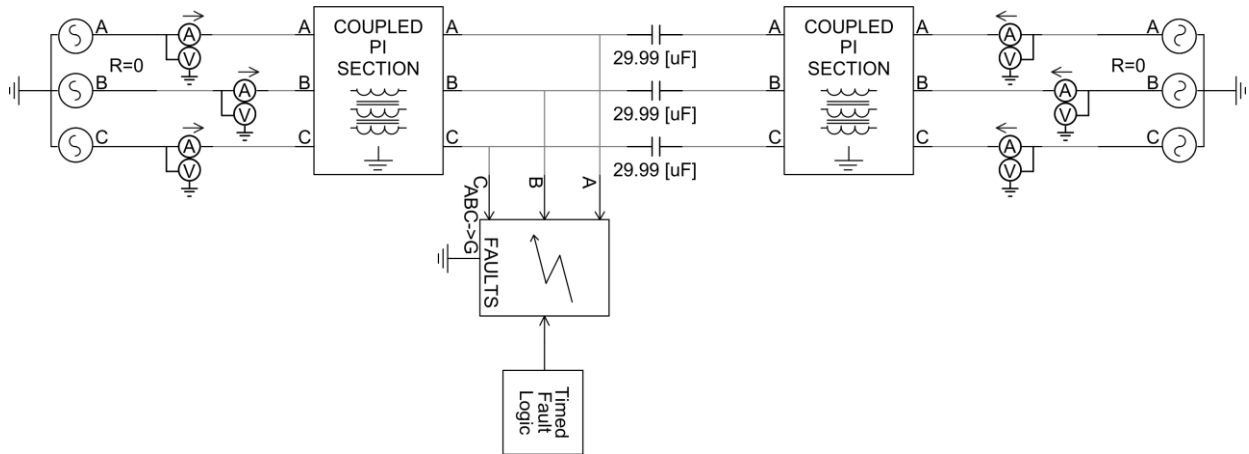


Рис. 1. Компьютерная модель электротехнической системы, выполненная в программе PSCAD



Рис. 2. Однолинейная принципиальная схема электрической системы, взятая за основу при проведении исследований

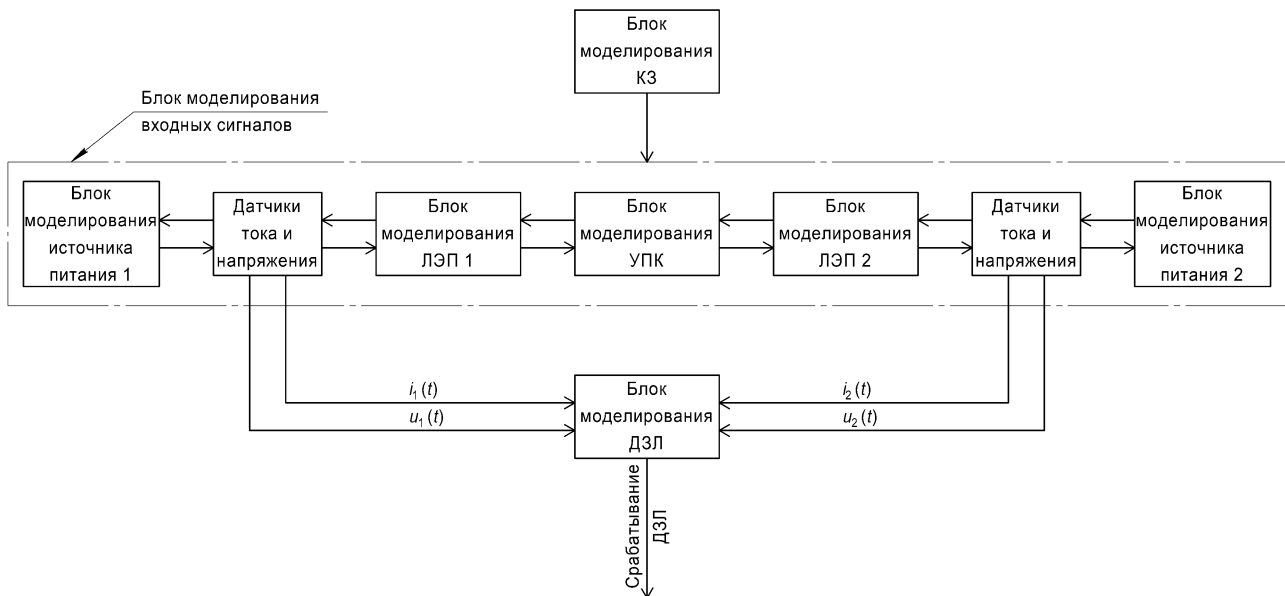


Рис. 3. Структурная схема компьютерной модели ДЗЛ

В данной схеме с помощью блочного принципа реализованы следующие элементы модели:

- блок моделирования КЗ, моделирующий внутреннее или внешнее КЗ с заданной длительностью;
- блок моделирования входных сигналов;
- блок моделирования ДЗЛ, моделирующий реакцию ДЗЛ на имитируемые повреждения.

Для симуляции разного рода коротких замыканий в блоке моделирования короткого замыкания задавались следующие параметры: сопротивление в месте КЗ; вид КЗ (трехфазное, двухфазное, двухфазное на землю, однофазное); длительность КЗ.

В целях симуляции входных сигналов для моделируемой релейной защиты, а также для изучения процессов, происходящих на

ЛЭП с УПК, использовался блок моделирования входных сигналов. Он, в свою очередь, включал в себя:

- блоки моделирования источников питания;
- блоки моделирования ЛЭП;
- блоки моделирования УПК;
- вспомогательные блоки, выполняющие функции датчиков тока и напряжения.

Для имитации источников электроэнергии использовались блоки моделирования источников питания. Они представляют собой трехфазные генераторы синусоидального напряжения со следующими настраиваемыми параметрами: уровень ЭДС (как правило, задавался равным 230 кВ); сдвиг по фазе (использовался для симуляции перетоков активной мощности, а также для симуляции качания); внутреннее сопротив-

ление (в зависимости от целей эксперимента задавалось равным от 0 до значений сопротивлений, характерных для энергосистем соответствующего класса напряжения).

Каждый блок ЛЭП представлял собой восьмиполюсник, схема замещения которого представлена на рис. 4.

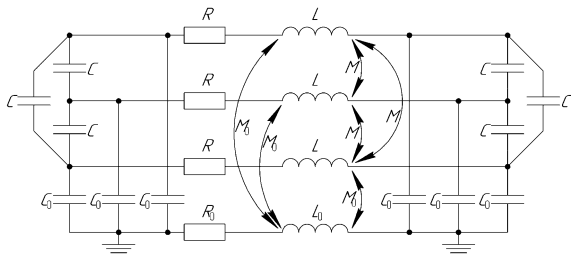


Рис. 4. Схема замещения участка линии электропередачи

При проведении исследований за основу были взяты две реально существующие линии электропередачи: Ухта–Микунь напряжением 220 кВ (в вариантах с сечением провода 400 и 500 мм²) и Братск–Иркутск напряжением 500 кВ. В зависимости от моделируемой линии в процессе исследования задавались следующие параметры: погонное активное сопротивление прямой и нулевой последовательности; индуктивное сопротивление прямой и нулевой последовательности; длина участка ЛЭП. При необходимости получения более детальных характеристик блоки ЛЭП дробились на более короткие участки.

Блок моделирования УПК представляет собой идеальный конденсатор с настраиваемой емкостью. Емкость конденсатора задавалась исходя из требуемой степени компенсации по формуле

$$C = \frac{1}{kj\omega X_L}, \quad (1)$$

где C – емкость конденсатора, Ф; k – степень (коэффициент) компенсации; j – мнимая единица; ω – угловая частота, рад/с; X_L – индуктивное сопротивление, Гн. Когда требовалась нулевая степень компенсации, блок УПК временно исключался из схемы.

При проведении исследований использовался алгоритм классической ДЗЛ, основанный на сравнении мгновенных значений токов, в котором дифференциальный ток вычисляется по формуле

$$i_{\text{диф}}(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad (2)$$

где $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – мгновенные значения токов по концам линии.

1 июля 2023 года в 19:03:28 по местному времени на одной из цепей воздушной ЛЭП Братск–Иркутск на расстоянии 92,96 км от УПК в сторону Братской ГЭС произошло дуговое короткое замыкание фазы С на землю. Для вери-

фикации разработанной компьютерной модели был воспроизведен данный режим, а результаты представлены на рис. 5, 6.

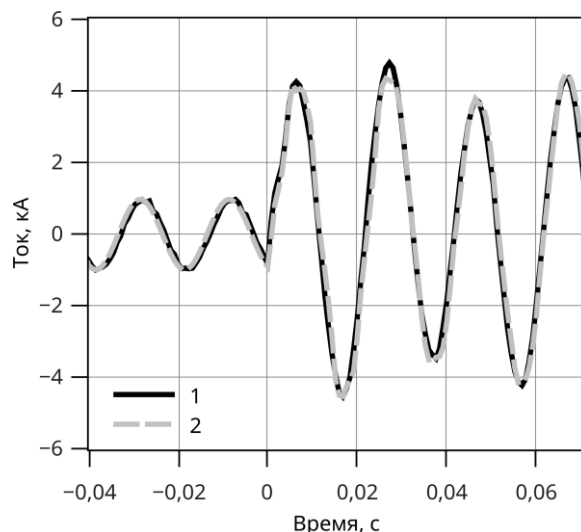


Рис. 5. Осциллограммы токов со стороны УПК: 1 – реальная осциллограмма; 2 – симуляция

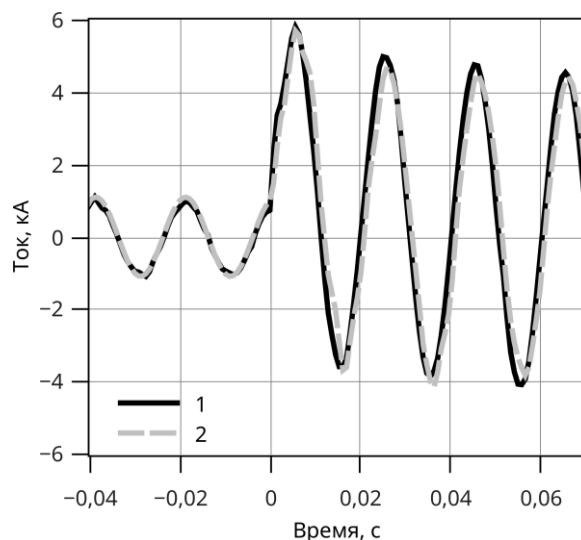


Рис. 6. Осциллограммы токов со стороны некомпенсированного участка: 1 – реальная осциллограмма; 2 – симуляция

В результате погрешность по амплитуде составила менее 12 %, погрешность по углу – менее 1,5 %. К возможным причинам расхождения результатов можно отнести следующие:

- отсутствие точных данных относительно режимов работы оборудования (величины ЭДС эквивалентных генераторов, а также их углы; сопротивление системы на конечных и промежуточных подстанциях; оперативное состояние электрической схемы);
- отсутствие точных данных о сопротивлениях в месте КЗ (сопротивление дуги; сопротивление заземляющего устройства опоры);
- использование в модели идеализированных эквивалентных генераторов (отсутствие ди-

намического качания роторов генераторов; отсутствие форсировки возбуждения во время КЗ);

- погрешности, обусловленные конечным шагом дискретизации, используемым при вычислениях.

Проведенная верификация разработанной компьютерной модели показала удовлетворительные результаты, что дает основание для ее использования при последующих исследованиях.

Результаты исследования. Посредством описанной модели было проведено исследование влияния переходного сопротивления в точке КЗ на параметры аварийного режима.

При проведении данного исследования, были приняты следующие количественные параметры схемы: степень компенсации продольного индуктивного сопротивления ЛЭП фиксированная и составляла 100 %; линейное напряжение источников электроэнергии 220 кВ; разность углов одноименных фаз по напряжению 0°; максимальное переходное сопротивление в месте КЗ выбиралось исходя из условия, что максимальное падение напряжения в дуге не превышает 40 % от номинала по напряжению электроустановки [6].

При проведении исследований в точке, где значение дифференциального тока минимально (на выводах УПК), имитировались короткие замыкания при различных значениях переходного сопротивления. Величина переходного сопротивления выбиралась исходя из величины падения напряжения в переходном режиме так, чтобы в пределе это падение не превышало 40 % от номинала электроустановки.

В ходе исследований получены зависимости величин дифференциального тока на компенсированной ЛЭП от величины сопротивления (падения напряжения) в точке КЗ (рис. 7).

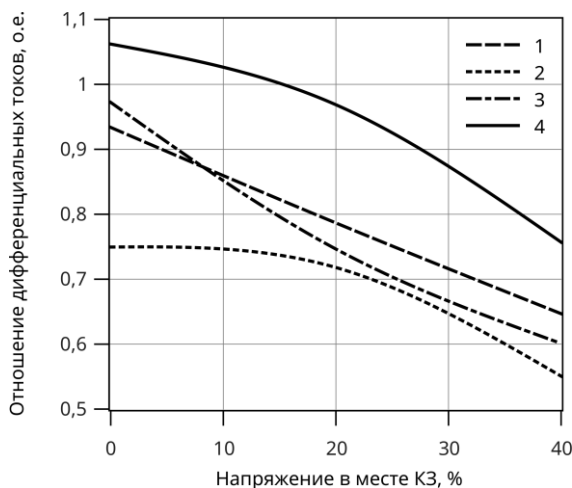


Рис. 7. Зависимость относительного значения минимального пика дифференциального тока на ЛЭП с УПК от доли номинального напряжения в месте КЗ: 1 — $I_{Диф}^{(3)}(U_{пер})$; 2 — $I_{Диф}^{(2)}(U_{пер})$; 3 — $I_{Диф}^{(11)}(U_{пер})$; 4 — $I_{Диф}^{(1)}(U_{пер})$

Для удобства эти зависимости были выражены через отношения этих токов к дифференциальным значениям токов на некомпенсированной ЛЭП. Таким образом, получены следующие зависимости:

$$I_{Диф}^{(3)}(U_{пер}) = \frac{I_{Диф100}^{(3)}(U_{пер})}{I_{Диф0}^{(3)}(U_{пер})}; \quad (3)$$

$$I_{Диф}^{(2)}(U_{пер}) = \frac{I_{Диф100}^{(2)}(U_{пер})}{I_{Диф0}^{(2)}(U_{пер})}; \quad (4)$$

$$I_{Диф}^{(11)}(U_{пер}) = \frac{I_{Диф100}^{(11)}(U_{пер})}{I_{Диф0}^{(11)}(U_{пер})}; \quad (5)$$

$$I_{Диф}^{(1)}(U_{пер}) = \frac{I_{Диф100}^{(1)}(U_{пер})}{I_{Диф0}^{(1)}(U_{пер})}; \quad (6)$$

$$I_{Диф}^{(11)}(R_{пер}) = \frac{I_{Диф100}^{(11)}(R_{пер})}{I_{Диф0}^{(11)}(R_{пер})}; \quad (7)$$

$$I_{Диф}^{(1)}(R_{пер}) = \frac{I_{Диф100}^{(1)}(R_{пер})}{I_{Диф0}^{(1)}(R_{пер})}; \quad (8)$$

где $U_{пер}$ — напряжение в месте КЗ; $R_{пер}$ — переходное сопротивление в месте КЗ; $I_{Диф100}^{(3)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока трехфазного КЗ на ЛЭП со 100 %-й степенью продольной компенсации; $I_{Диф0}^{(3)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока трехфазного КЗ на ЛЭП без УПК; $I_{Диф100}^{(2)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока двухфазного КЗ на ЛЭП со 100 %-й степенью продольной компенсации; $I_{Диф0}^{(2)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока двухфазного КЗ на ЛЭП без УПК; $I_{Диф100}^{(11)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока двухфазного КЗ на землю на ЛЭП со 100 %-й степенью продольной компенсации; $I_{Диф0}^{(11)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока двухфазного КЗ на землю на ЛЭП без УПК; $I_{Диф100}^{(1)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока однофазного КЗ на ЛЭП со 100 %-й степенью продольной компенсации; $I_{Диф0}^{(1)}$ — минимально возможный пик дифференциального тока однофазного КЗ на ЛЭП без УПК.

Отметим, что минимально возможный пик дифференциального тока на ЛЭП без УПК численно совпадает с амплитудой дифференциального тока в установившемся режиме.

Анализ полученных зависимостей (рис. 7) показал, что наличие УПК на ЛЭП не оказывает существенного влияния на снижение дифференциального тока при однофазном и двухфаз-

ном КЗ на землю (при условии, что переходное сопротивление стремится к нулю). Влияние переходного сопротивления на токи КЗ на ЛЭП с УПК, так же как и на ЛЭП без УПК, в месте КЗ приводит к снижению как самих токов, так и их дифференциальных значений (в переходном и установившемся режимах). Наличие переходного сопротивления, по сравнению с аналогичными токами на некомпенсированной ЛЭП, ощутимо снижает амплитуду минимально возможного пика дифференциального тока на ЛЭП с УПК. Это, в первую очередь, объясняется тем, что повышение значения активного сопротивления в колебательном контуре за счет увеличения переходного сопротивления в месте КЗ приводит к увеличению скорости затухания переходного процесса, что пропорционально сказывается на величине амплитуды дифференциального тока. Для однофазного и двухфазного КЗ данная тенденция имеет лавинообразную характеристику, так как снижение дифференциального тока вследствие увеличения переходного сопротивления по закону Ома приводит к меньшей просадке напряжения, что, в свою очередь, для достижения равнозначного уровня напряжения в месте КЗ требует увеличения $R_{\text{пер}}$ по сравнению с аналогичной ЛЭП без УПК. Отметим, что подобное увеличение сопротивления при дуговых коротких замыканиях происходит автоматически, так как, согласно [7–9], сопротивление дуги обратно пропорционально силе тока:

$$r_d = 1050 \cdot \frac{I_d}{I_d}, \quad (9)$$

где r_d – активное сопротивление дуги, Ом; I_d – длина дуги, м; I_d – действующее значение тока в дуге, А.

В литературе также приводятся следующие выражения:

$$r_d = 2500 \frac{I_d}{I_d}; \quad (10)$$

$$r_d = 28700 \frac{I_d}{I_d^{1.4}}; \quad (11)$$

$$r_d = 370 \frac{I_d}{I_d^{0.87}}. \quad (12)$$

В [10, 11] рекомендуется выражение (10), в [12] – выражение (11), в [13] – выражение (12). В [7] отмечается, что получаемые по формуле (12) значения r_d при значительных токах (тысячи ампер) не имеют больших расхождений со значениями, определяемыми по (9). В [6] также отмечается, что по сравнению с выражением (10) формула Варрингтона (11) дает более точное приближение. Выражения (9)–(12) объединяют нелинейный характер сопротивления дуги, значение которого обратно пропорционально силе тока. Таким образом, характеристики, при-

веденные на рис. 7, помимо теоретической новизны имеют прикладной характер, так как меньшее значение дифференциального тока на ЛЭП с УПК приводит к увеличению сопротивления в месте КЗ, что, в свою очередь, приводит к еще большему ограничению тока (и т.д. до тех пор пока не установится баланс).

Математические выкладки (9)–(12) справедливы и для зависимости $I_{\text{Диф}}^{(1,1)}(U_{\text{пер}})$, однако влияние на ее форму оказывает также распределение во времени минимальных пиков абсолютных значений дифференциального тока при переходном процессе (рис. 8).

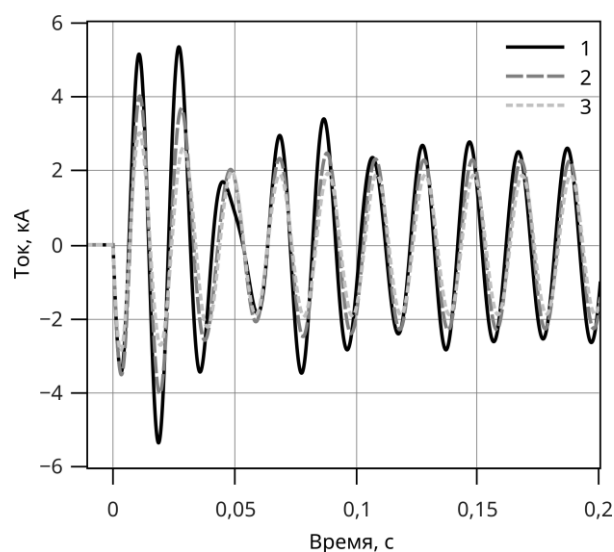


Рис. 8. Осциллограммы дифференциального тока при двухфазном КЗ на землю при различных значениях $U_{\text{пер}}$: 1 – $U_{\text{пер}} = 0\%$; 2 – $U_{\text{пер}} = 20\%$; 3 – $U_{\text{пер}} = 40\%$

Так как резонансная частота свободных колебаний, содержащихся в дифференциальном токе при двухфазном замыкании на землю, оказывается ниже, чем при всех остальных видах коротких замыканий, минимально возможные пики приходится на третий и четвертый полупериоды. Так как дополнительное активное сопротивление приводит к резкому сокращению значения постоянной времени вышеобозначенных колебаний, вышеобозначенные пики срезаются экспонентой, амплитуды предыдущих полупериодов также подлежат корректировке в меньшую сторону. В результате минимально возможные пики смещаются ближе к моменту начала короткого замыкания, что вносит свои коррективы в форму кривой $I_{\text{Диф}}^{(1,1)}(U_{\text{пер}})$.

Для большей наглядности на рис. 8 приводятся осциллограммы, полученные посредством линейного сопротивления, величина которого выбиралась исходя из того, чтобы амплитудное значение напряжения во время пиковых значений дифференциального тока составляло соответственно 0%, 20% и 40% от амплитудных значений номинального напряжения. При

этом расхождение результатов относительно значений пиков дифференциального тока, полученных посредством использования элементов, имитирующих ВАР электрической дуги, составляет менее 5 %.

Необходимо отметить, что характеристики отношений минимально возможных пиков дифференциального тока для двухфазного и трехфазного КЗ совпадают между собой. Однако, ввиду того что отсутствие апериодической составляющей одновременно во всех трех фазах невозможно, решающее значение для релейной защиты имеют токи фаз, содержащих апериодическую составляющую со стороны некомпенсированного участка, что вносит свои коррективы в форму кривой, вырождая ее в прямую.

На рис. 9 приводятся зависимости $I_{\text{Диф}}^{(11)}(R_{\text{пер}})$ и $I_{\text{Диф}}^{(1)}(R_{\text{пер}})$. Для однофазного короткого замыкания правая граница графика (30 Ом) соответствует величине сопротивления при дуговом коротком замыкании с $U_{\text{пер}} = 40\%$ (при двухфазном КЗ на землю падение напряжения при $R_{\text{пер}} = 30$ Ом на заземляющем устройстве опоры ЛЭП составило 26,86 %). Анализ данных зависимостей (рис. 9) показывает, что выравнивание сопротивлений на ЛЭП с УПК и без него приводит к искажению формы кривой по сравнению с зависимостями на рис. 7 и уменьшению разницы между дифференциальными токами на этих линиях электропередачи.

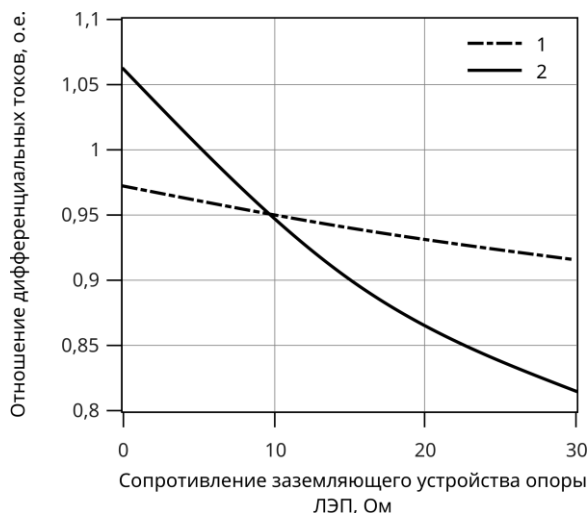


Рис. 9. Зависимости относительного значения минимального пика дифференциального тока на ЛЭП с УПК от $R_{\text{пер}}$: 1 — $I_{\text{Диф}}^{(11)}(R_{\text{пер}})$; 2 — $I_{\text{Диф}}^{(1)}(R_{\text{пер}})$

Выводы. Разработанная компьютерная модель участка электрической сети с устройством продольной компенсации позволяет количественно оценить влияние УПК на значения токов КЗ по разным концам линии и исследовать параметры, влияющие на чувствитель-

ность дифференциальной защиты продольно компенсированной ЛЭП.

Полученные в ходе исследований зависимости величин дифференциального тока на компенсированной ЛЭП от величины сопротивления (падения напряжения) в точке КЗ могут быть использованы при решении задач повышения устойчивости функционирования дифференциальной защиты на ЛЭП с УПК, а также при проведении дополнительных исследований с помощью разработанной модели.

Список литературы

1. **Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р.** Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2022. — Т. 24, № 6. — С. 102–123. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.
2. **Атабеков Г.И.** Вопросы релейной защиты линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией // Электричество. — 1953. — № 8. — С. 5–8.
3. **Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В.** Оценка селективности дифференциальной защиты линии электропередачи напряжением 220 кВ с устройством продольной компенсации // Изв. вузов. Электромеханика. — 2023. — Т. 66, № 2. — С. 68–75. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-68-75.
4. **Altuve H.J., Mooney J.B., Alexander G.E.** Advances in Series-Compensated Line Protection. Proceedings of the 63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference; 22–24 Apr 2009. Atlanta, Georgia, 2009 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6340_SeriesCompLineProt_JM_20081022_Web.pdf.
5. **Manditereza P.T.** An enhanced sensitive power differential protection for series compensated transmission lines in renewable generation intensive power systems. Engineering Science and Technology, an International Journal. — 2023. — Vol. 46. — P. 101506 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098623001842/pdf?md5=33a941014960aa814aa185d06795f88d&pid=1-s2.0-S2215098623001842-main.pdf>.
6. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. — М.: Энергоатомиздат, 2007. — 549 с.
7. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем: учебник для вузов. — М.: Энергия, 1976. — 560 с.
8. **Бургсдорф В.В.** Открытые электрические дуги большой мощности // Электричество. — 1948. — № 10. — С. 15–23.
9. **Schleicher M.** (Der Herausgeber). Die modern Selektivschutztechnik. — Verlag Springer, 1936. — 418 s.
10. **Фабрикант В.Л.** Дистанционная защита: учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1978. — 215 с.
11. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. — М.: ГЭИ, 1957. — 344 с.
12. **Warrington A.R. van C.** Protective Relays, their theory and practice. — London: Chapman–Hall, 1962.

13. Schier A. Resistance of electrical fault arc in very high voltage networks // *Elec. India*. – 1970. – No. 8. – P. 5–9.

References

1. Ivanov, I.Yu., Novokreshchenov, V.V., Ivanova, V.R. Sovremennoe sostoyanie problem funktsionirovaniya kompleksov reley noy zashchity i avtomatiki, primenyayemykh v aktivno-adaptivnoy seti [Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 102–123. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.
2. Atabekov, G.I. Voprosy reley noy zashchity liniy elektropredachi s prodol'noy emkostnoy kompensatsiyey [Issues of relay protection of power transmission lines with longitudinal capacitive compensation]. *Elektrichestvo*, 1953, no. 8, pp. 5–8.
3. Ivanov, I.Yu., Novokreshchenov, V.V. Otsenka selektivnosti differentsial'noy zashchity linii elektropredachi napryazheniem 220 kV s ustroystvom prodol'noy kompensatsii [Estimating the Selectivity of the 220 kV Power Line Differential Protection with Series Capacitor Bank]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 68–75. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-68-75.
4. Altuve, H.J., Mooney, J.B., Alexander, G.E. Advances in Series-Compensated Line Protection. *Proceedings of the 63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference; 22–24 Apr 2009*. Atlanta, Georgia, 2009. Available at: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6340_SeriesCompLineProt_JM_20081022_Web.pdf.
5. Manditereza, P.T. An enhanced sensitive power differential protection for series compensated transmission lines in renewable generation intensive power systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 46, p. 101506. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098623001842/pdf?md5=33a941014960aa814aa185d06795f88d&pid=1-s2.0-S2215098623001842-main.pdf>
6. Shneerson, E.M. *Tsifrovaya reley naya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.
7. Fedoseev, A.M. *Reley naya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976. 560 p.
8. Burgsdorf, V.V. Otkrytie elektricheskikh dugi bol'shoy moshchnosti [Open high power electric arcs]. *Elektrichestvo*, 1948, no. 10, pp. 15–23.
9. Schleicher, M. (Der Herausgeber). *Die modern Selektivschutztechnik*. Verlag Springer, 1936. 418 p.
10. Fabrikant, V.L. *Distsionnaya zashchita* [Distance relay protection]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 215 p.
11. Atabekov, G.I. *Teoreticheskie osnovy reley noy zashchity vysokovol'tnykh setey* [Theoretical foundations of relay protection of high-voltage networks]. Moscow: GEI, 1957. 344 p.
12. Warrington, A.R. van C. *Protective Relays, their theory and practice*. London: Chapman – Hall, 1962.
13. Schier, A. Resistance of electrical fault arc in very high voltage networks. *Elec. India*, 1970, no. 8, pp. 5–9.