

DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-100-106

УДК 621.31

ББК 31.25

А.И. ОРЛОВ, С.В. ВОЛКОВ, И.Х. ГАРИПОВ, С.Г. НИКИФОРОВ

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ОТБОРА МАЛЫХ МОЩНОСТЕЙ ОТ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ключевые слова: отбор мощности, вторичный источник, воздушная линия электропередачи, изолированная нейтраль, емкостный делитель напряжения, конденсатор.

Рассматривается возможность применения емкостного отбора мощности от воздушных линий электропередачи среднего напряжения с изолированной нейтралью. Прямое масштабирование конструкций известных однофазных устройств емкостного отбора мощности, предназначенных для воздушных линий электропередачи высокого напряжения, нецелесообразно по ряду причин: невозможности получения значительной мощности, нарушения условий работы защиты от однофазных замыканий на землю, создания несимметрии фазных напряжений относительно земли. В качестве устройства отбора мощности предложено применение трехфазной симметричной схемы емкостного делителя напряжения с преобразователем напряжения на выходе, позволяющей минимизировать обозначенные недостатки. На основе компьютерного моделирования схемы замещения участка воздушной линии с устройством отбора мощности получены его внешние характеристики при различных значениях емкостей конденсаторов делителя напряжения. Результаты моделирования подтверждают техническую возможность и целесообразность применения предложенного способа отбора мощности для питания маломощных одно- и трехфазных потребителей.

Введение. Повсеместное распространение «умных» устройств в электросетевом комплексе, несмотря на улучшение оперативных возможностей по мониторингу и управлению сетями, поднимает вопрос собственного электропитания таких устройств. Питание камер видеонаблюдения, датчиков различного назначения, зарядных станций для БПЛА и других устройств, расположенных вдоль воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), если сооружение отдельных трансформаторных подстанций экономически нецелесообразно, может осуществляться от аккумуляторных батарей или непосредственно от линии.

Значимость проблемы отбора мощности от воздушных линий подтверждает большое количество исследований по данной тематике. Пример бесконтактного устройства отбора мощности представлен в патенте [4]. Первичный преобразователь представляет собой плоскую металлическую сетку и отрезок многопроводного кабеля, разложенных на земле вдоль направления фазных проводов линии. Недостатком данной и аналогичных конструкций устройств, основанных на использовании электромагнитной составляющей наведенного напряжения, является зависимость ЭДС разработанного преобразователя от тока линии. В периоды низкой загрузки ВЛЭП такие преобразователи не способны обеспечить питание даже маломощной нагрузки. Коллектив авторов работы [4] является разработчиком других конструкций устройств отбора мощности от ВЛЭП, например, в [7].

Известны конструкции первичных преобразователей, выполненных аналогично конструкции трансформаторов тока. Вокруг замкнутого магнитопровода, в отверстие которого пропущен фазный проводник ВЛ, играющий роль первичной обмотки трансформатора, намотана вторичная обмотка. Нагрузка подключается ко вторичной обмотке через преобразователь. Примером конструкций подобного типа является [6] и др. Недостатком таких устройств является близость расположения первичного преобразователя и проводника линии высокого напряжения, что создает опасность электрического пробоя при питании нагрузки, находящейся под потенциалом земли.

Серийно выпускаются устройства, основанные на использовании электростатической составляющей наведенного напряжения, например, для световой маркировки высоковольтных проводов ВЛЭП с напряжением более 60 кВ [1–3]. К недостаткам устройств такого типа относится сложность передачи электроэнергии потребителям, расположенным на уровне земли, по соображениям электробезопасности, а также невозможность применения при напряжении линии 10–35 кВ.

Существуют проекты устройств отбора мощности, основанные на использовании емкостного делителя напряжения. Известные конструкции предназначены для работы от линии с эффективно или глухозаземленной нейтралью высокого напряжения. Стоимость устройств такого исполнения сопоставима со стоимостью трансформаторной подстанции из-за необходимости применения изоляции на высокое напряжение. Кроме того, существует опасность появления на нагрузке полного фазного напряжения линии при обрыве проводника заземлённого конденсатора.

Целью работы является анализ технико-экономической целесообразности применения емкостного отбора мощности от воздушных линий электропередачи 10 кВ, имеющих изолированную нейтраль, для питания маломощных потребителей. Общая протяженность линий среднего напряжения составляет 663 тыс. км [5].

Прямое масштабирование однофазных устройств емкостного отбора мощности, применяемых для ВЛЭП 110 кВ, в данном случае нецелесообразно по следующим причинам:

а) подключение устройства отбора мощности между одним из фазных проводников в какой-либо точке линии и землей не позволяет получить значительный ток линии и обеспечить мощность выше 0,5–1,0 кВт. Даже предельный случай – однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) – сопровождается относительно небольшим током, порядка нескольких десятков ампер.

б) отбор мощности, связанный с замыканием устройства на землю, приводит к значительному перекосу напряжений проводников ВЛЭП относительно земли в сотни и более вольт;

в) принцип работы релейной защиты от ОЗЗ основан на сравнении суммарного тока трех проводников линии с заданной уставкой. Замыкание на землю устройства отбора мощности может нарушать условия работы существующей защиты от ОЗЗ.

Применение трехфазного симметричного устройства отбора мощности позволяет практически устранить обозначенные недостатки и преодолеть ограничения по мощности отбора. Исследование таких устройств, работающих по принципу емкостного делителя напряжения, составляет научную новизну работы.

Методологическую базу исследования составляет теоретическая электротехника, в частности один из методов теории цепей – модифицированный метод узловых потенциалов [8]. Рассматриваемые объекты и явления исследовались в форме компьютерных моделей, реализованных авторами на языке Python. Верификация разработанных моделей осуществлялась путем сравнения с функционально аналогичными моделями, собранными в программе MATLAB Simulink. Выводы по работе сформулированы на основе индуктивных обобщений результатов моделирования.

На рис. 1 показана упрощенная однолинейная схема участка электрической сети 10 кВ, питающая нагрузку, подключенную к трансформатору 10/0,4 кВ. Устройство отбора мощности может располагаться на произвольном удалении от начала ВЛЭП.

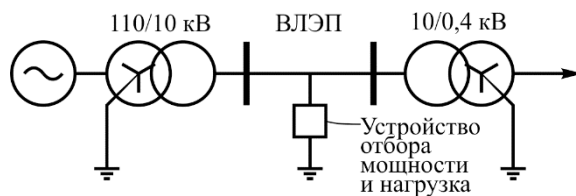


Рис. 1. Положение устройства отбора мощности в электрической системе

На рис. 2 показана соответствующая схема замещения, в таблице приведены ее параметры.

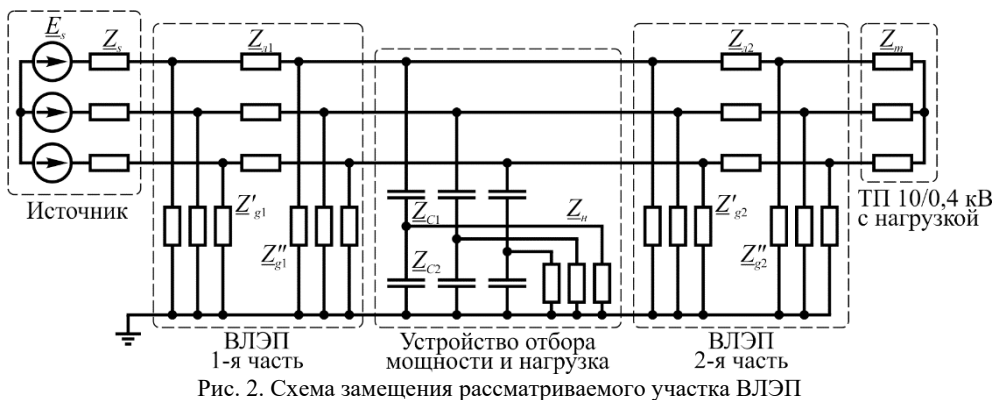


Рис. 2. Схема замещения рассматриваемого участка ВЛЭП

Электрическую систему на стороне 110 кВ и трансформатор 110/10 кВ замещает схема трехфазного эквивалентного генератора, представленного в каждой фазе источниками ЭДС E_s и сопротивлениями Z_s . ВЛЭП 10 кВ разбита на два участка по 5 км: до устройства отбора мощности и после него. Каждая

фаза участка ВЛЭП показана в виде П-образной схемы замещения с последовательным сопротивлением Z_l и параллельными сопротивлениями Z_g' и Z_g'' . Трансформатор 10/0,4 кВ и нагрузка на стороне 0,4 кВ представлены сопротивлениями Z_m . Устройство отбора мощности в каждой фазе представлено емкостным делителем напряжения $Z_{C1} = jX_{C1}$ и $Z_{C2} = jX_{C2}$ и нагрузкой $Z_H = R_H$. Одинаковая по фазам нагрузка в виде сопротивлений Z_H может являться выпрямителем, инвертором или другим преобразователем с подключенной одно- или трехфазным энергопринимающим устройством.

Параметры схемы замещения

Величина/параметр	Значение	Величина/параметр	Значение
$E_{sa} = E_{sb} \cdot e^{+j\pi/3} = E_{sc} \cdot e^{-j\pi/3}$	5773 В	$Z_{ga}' = Z_{gb}' = Z_{gc}' = Z_{ga}'' = Z_{gb}'' = Z_{gc}''$	$-j17690$ Ом
$Z_{sa} = Z_{sb} = Z_{sc}$	$2 + j0,2$ Ом	$Z_{ma} = Z_{mb} = Z_{mc}$	1375 Ом
$Z_{l1a} = Z_{l1b} = Z_{l1c}$	$2,9755 + j1,7427$ Ом	Z_H	$0 - \infty$ Ом

Результаты. Результаты моделирования представлены в виде графиков на рис. 3, полученных при изменении сопротивления нагрузки $Z_H = R_H$ в каждой фазе в широких пределах.

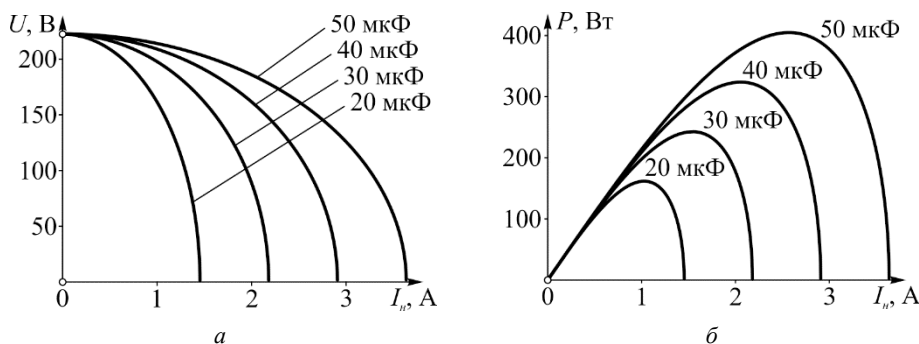


Рис. 3. Внешняя характеристика (а) и зависимость активной мощности от тока нагрузки (б) при различных значениях емкостей C_2

Параметры емкостного делителя напряжений варьировались, но сохранялось отношение сопротивлений $X_{C1} / X_{C2} = 25$, что соответствует отношению емкостей $C_2 / C_1 = 25$. В работе рассматривались модели с несколькими значениями емкостей C_2 от 20 до 50 мкФ. При неизменном соотношении емкостей напряжения холостого хода U_0 также не изменяются независимо от числовых значений C_1 и C_2 , как показано на рис. 3, а. Несмотря на падающий характер внешних характеристик, применение на выходе делителя трехфазного стабилизатора напряжения позволит минимизировать падение напряжения на клеммах потребителя. Предельная мощность 1 фазы, показанная на рис. 3, б, при $C_2 = 50$ мкФ достигает 400 Вт. Реактивная мощность конденсатора C_2 , равная 775 вар при холостом ходе, снижается с ростом нагрузки. Емкость C_1 может

быть собрана из нескольких последовательно соединенных конденсаторов, суммарная мощность которых составляет около 20 квар.

Предложенный способ отбора мощности может быть реализован с использованием серийно выпускаемых конденсаторов, предназначенных для компенсации реактивной мощности. Так, применение в качестве C_2 конденсатора емкостью 50 мкФ номинальной мощностью 2,5 квар и напряжением 400 В позволяет собрать емкость C_1 из 15 последовательно соединенных конденсаторов емкостью 30 мкФ номинальной мощностью 1,5 квар номинальным напряжением 400 В. Стоимость устройства с указанными параметрами сопоставима с силовым трансформатором номинальной мощностью 16–25 кВА. Благодаря широкой номенклатуре и доступности конденсаторов источник питания можно масштабировать, обеспечивая заданные внешние характеристики и мощность.

Рассмотренное в работе устройство, работающее в составе электроэнергетической системы с конкретным сочетанием параметров, подтверждает принципиальную возможность его применения для питания маломощных потребителей, что определяет практическую значимость работы. Исследование влияния характеристик системы и трансформатора 10/0,4 кВ с нагрузкой, местоположения устройства относительно начала линии и других факторов может составлять *перспективы* дальнейших научных разработок.

Выводы. 1. Результаты моделирования подтверждают техническую возможность отбора малых мощностей от воздушных линий электропередачи среднего напряжения за счет применения трехфазного симметричного емкостного делителя напряжения.

2. Трехфазное симметричное исполнение устройства позволяет применять его в сетях с изолированной нейтралью, не нарушая условия работы защиты от ОЗЗ и режима работы воздушной линии электропередачи.

3. Устройство генерирует в сеть реактивную мощность, компенсируя реактивную мощность индуктивного характера других потребителей и способствуя повышению пропускной способности линии.

4. Устройство может использоваться в однофазном исполнении, однако его мощность ограничена допустимым значением тока нулевой последовательности.

Литература

1. *Золотарев И.* Устройство отбора мощности с фазного провода воздушной линии электропередачи [Электронный ресурс]. URL: <https://gridology.ru/projects/434> (дата обращения: 07.10.2021).

2. *Ляпунов Е.В.* Обобщение мировых тенденций развития техники и технологий электроэнергетики // Материалы отчетной конференции РНК СИГРЭ по итогам 46-й Сессии СИГРЭ, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <http://cigre.ru/46ru/presentations/%D0%922%D0%9B%D0%AF%D0%9F%D0%A3%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%95.%D0%92.%20.pdf> (дата обращения: 07.10.2021).

3. Маркеры для воздушных линий электропередачи. Маркировка опор и пролетов ВЛ. Стандарт организации ПАО «Россети» [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/34.01-2.2-016-2016.pdf (дата обращения: 07.10.2021).

4. Патент РФ 2476967. Система отбора мощности от трехфазной линии передачи высокого напряжения / Геворкян В.М., Казанцев Ю.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»; заявл. № 212100634/07 от 21.02.2012 г.; публ. 27.02.2013 г. Бюл. № 6.

5. Патент РФ 2414034. Вторичный источник питания с отбором мощности от фазного провода линии электропередачи высокого напряжения промышленной частоты / Бунин А.В. и др.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»; заявл. 2010113278/07, 07.04.2010 г.; публ. 10.03.2011 г. Бюл. № 7.

6. Патент РФ 120519. Вторичный источник питания с отбором мощности от фазного провода линии электропередачи высокого напряжения промышленной частоты / Геворкян В.М. и др.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»; заявл. 2012117368/07 от 27.04.2012 г.; публ. 20.09.2012 г. Бюл. № 26.

7. Система световой маркировки высоковольтных проводов ЛЭП с напряжением более 60 кВ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.n-es.ru/index.php/produktsiya/obsta-balisors> (дата обращения: 07.10.2021).

8. Ho C., Ruehli A., Brennan P. The modified nodal approach to network analysis. Available at: <https://cseweb.ucsd.edu/classes/fa04/cse245/Reading/MNA.pdf> (Access Date 2021, Oct. 7).

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (karlorlov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

ВОЛКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (svedin2011@mail.ru).

ГАРИПОВ ИЛЬСУР ХАЛИЛЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (ilsur@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-7365>).

НИКИФОРОВ СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – студент IV курса электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (oscol2700@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9157-9684>).

Alexandr I. ORLOV, Sergey V. VOLKOV,
Ilsur Kh. GARIPOV, Sergey G. NIKIFOROV

**ANALYSIS OF POSSIBILITY OF LOW POWER TAKE-OFF
FROM MEDIUM VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES**

Key words: power take-off, secondary source, overhead power line, isolated neutral, capacitive voltage divider, capacitor.

The paper considers the possibility of using capacitive power take-off from medium voltage overhead power lines with isolated neutral. Direct scaling of the designs of the known 1-phase capacitive power take-off devices intended for high voltage overhead power lines is impractical for several reasons: the impossibility of obtaining significant power, violation of the operating conditions of protection against single-phase earth faults, the creation of asymmetry of phase voltages relative to the ground. As a power take-off device, it is proposed to use a 3-phase symmetrical circuit of a capacitive voltage divider with a voltage converter at the output, which makes it possible to minimize the indicated disadvantages. On the basis of computer simulation of the equivalent circuit of an overhead line section with a power take-off device, its external characteristics were obtained for various values of the capacitance of the voltage divider capacitors. The simulation results confirm the technical feasibility and feasibility of using the proposed power take-off method for feeding low-power 1- and 3-phase consumers.

References

1. Zolotarev I. *Ustroistvo otbora moshchnosti s faznogo provoda vozduшной линии elektrperedachi* [Power take-off device from a phase conductor of an overhead power transmission line]. Available at: <https://gridology.ru/projects/434> (Accessed Date 2021, Oct. 7).
2. Lyapunov E.V. *Obobshchenie mirovykh tendentsii razvitiya tekhniki i tekhnologii elektro-energetiki* [Generalization of world trends in the development of equipment and technologies in the electric power industry]. *Materialy otchetnoi konferentsii RNK SIGRE po itogam 46-i Sessii SIGRE, 2017* [Materials of the RNC CIGRE Reporting Conference following the 46th CIGRE Session, 2017]. Available at: <http://cigre.ru/46ru/presentations/%D0%922%20%D0%9B%D0%AF%D0%9F%D0%A3%D0%9D%D0%9E%D0%92%20%D0%95.%D0%92.%20.pdf> (Accessed Date 2021, Oct. 7).
3. *Markery dlya vozduшных линий электропередачи. Markirovka opor i proletoy VL. Standart organizatsii PAO «Rosseti»* [Markers for overhead power lines. Marking of supports and spans of overhead lines. Organization standard of PJSC Rosseti.]. Available at: https://www.rosseti.ru/invest/ment/standart/corp_standart/doc/34.01-2.2-016-2016.pdf (Accessed Date 2021, Oct. 7).
4. Bunin A.V. et al. *Vtorichnyi istochnik pitaniya s otborom moshchnosti ot faznogo provoda линии электропередачи vysokogo napryazheniya promyshlennoi chastoty* [Secondary power supply with power take-off from the phase conductor of the high voltage power transmission line of industrial frequency]. Patent RF, no. 2414034, 2011.
5. Gevorkyan V.M. et al. *Vtorichnyi istochnik pitaniya s otborom moshchnosti ot faznogo provoda линии электропередачи vysokogo napryazheniya promyshlennoi chastoty* [Secondary power supply with power take-off from the phase conductor of the high voltage power transmission line of industrial frequency]. Patent RF, no. 120519, 2012.
6. Gevorkyan V.M., Kazantsev Yu.A. *Sistema otbora moshchnosti ot trekhfaznoi линии peredachi vysokogo napryazheniya* [Power take-off system from three-phase high voltage transmission line]. Patent RF, no. 2476967, 2013.
7. *Sistema svetovoi markirovki vysokovol'tnykh provodov LEP s napryazheniem bolee 60 kV* [The system of light marking of high-voltage wires of power transmission lines with a voltage of more than 60 kV]. Available at: <http://www.n-es.ru/index.php/produksiya/obsta-balisors> (Accessed Date 2021, Oct. 7).
8. Ho C., Ruehli A., Brennan P. The modified nodal approach to network analysis. Available at: <https://cseweb.ucsd.edu/classes/fa04/cse245/Reading/MNA.pdf> (Access Date 2021, Oct. 7).

ALEKSANDR I. ORLOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (karlorlov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

SERGEI V. VOLKOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Electroenergy Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (svedin2011@mail.ru).

ILSUR Kh. GARIPOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (ilsur@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-7365>).

SERGEY G. NIKIFOROV – 4th Year Student, Faculty of Electric Power Engineering, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (oscol2700@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9157-9684>).

Формат цитирования: Орлов А.И., Волков С.В., Гарипов И.Х., Никифоров С.Г. Анализ возможности отбора малых мощностей от воздушных линий электропередачи среднего напряжения // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 100–106. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-100-106.