

Лаверенов Александр Сергеевич, асп., lavrenov22@gmail.com, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF BOOSTER CASCADE FOR POWER SUPPLY SYSTEMS

V.S. Klimash, A.S. Lavrenov

Two methods of regulating inverters of a multilevel voltage of the booster cascade are revealed by means of analytic relationships. The realization of these methods on a mathematical model and experimental setup is shown.

Key words: booster cascade, multi-level voltage regulation, reduction of power losses in the grid, improvement of voltage quality in consumers.

Klimash Vladimir Stepanovich, doctor of technical sciences, professor, klimash@yandex.ru, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State Technical University,

Lavrenov Alexander Sergeevich, postgraduate, lavrenov22@gmail.com, Russia Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State Technical University

УДК 621.3.051

**ПЕРЕВОД ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОСТОЯННЫЙ ТОК**

Я.Э. Шклярский, С.В. Соловьев, А.И. Барданов

Проведен анализ возможности изменения рода тока в линиях электропередач среднего уровня напряжения для увеличения потока активной мощности. Произведено сравнение различных способов передачи электроэнергии на постоянном токе, исключая случаи, когда используется возврат тока по земле. Введено понятие коэффициента запаса мощности для оценки и сравнения возможности увеличения пропускной способности и передаваемой активной мощности в линиях электропередач (ЛЭП). Получены и представлены в виде трехмерных графиков зависимости коэффициента запаса мощности от параметров линии и характера нагрузки.

Ключевые слова: Пропускная способность ЛЭП, постоянный ток, активная мощность, средний уровень напряжения.

Энергосистемы России отличаются большой протяженностью линий электропередач как высокого напряжения, так и среднего. Протяженность магистральных линий электропередач (ЛЭП) в России, по некоторым данным, составляет более 3 млн км. Из них более трети – среднего уровня напряжения (1...35 кВ) [1]. Подобные линии питают широкий спектр потребителей – от небольших населенных пунктов до промышленных объектов, в том числе предприятий минерально-сырьевого комплекса.

Темпы роста промышленности и жилого сектора диктуют потребность в наращивании генерируемых мощностей и в увеличении пропускной способности ЛЭП. В соответствии с прогнозом, представленным в приказе Министерства энергетики от 11 марта 2016 №147 «Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы России на 2016-2022 гг.» [2], планируется увеличение спроса на электроэнергию в районах России с развитой горной промышленностью (Красноярский край, республика Саха) на 2...4 % каждый год. С 2000 по 2007 годы спрос на электроэнергию вырос на 15,7 % [3]. Установленная активная мощность потребителя постоянно увеличивается, поэтому из средств бюджета планируется выделение до 170 млн долларов на развитие электроэнергетики, в том числе до 70 млн долларов на модернизацию энергетических сетей, что включает работы по увеличению пропускной способности существующих ЛЭП.

Модернизация ЛЭП обычно предполагает замену изношенных проводников, средний срок службы которых должен быть не меньше 40 лет для напряжения менее 35 кВ [4]. При этом для увеличения пропускной способности производится увеличение площади сечения проводников, либо замена их на более термостойкие [5]. Однако данная процедура не целесообразна, если срок службы проводов еще не вышел. Более того, процедура по их замене проводов в ЛЭП требует значительных капиталовложений, связанных с демонтажем старых проводов. Также может потребоваться замена опорных конструкций (из-за увеличения удельного веса проводников).

Существует ряд методов увеличения потока активной мощности ЛЭП без замены проводников. Из них можно выделить несколько основных способов: продольная компенсация реактивной мощности; поперечная компенсация; повышение уровня напряжения в линии электропередач средствами вольто-добавочных трансформаторов. Существует нетривиальный метод, который получил свое распространение в сетях высокого напряжения (более 35 кВ), сущность которого состоит в изменении рода тока [6].

В представленной работе рассматривается применение этого метода на средних уровнях напряжения. Конструктивно топология линии постоянного тока в таком случае может быть подключена к сети переменного тока с помощью преобразователей. Развитие полупроводниковых приборов (в основном IGBT-транзисторов) таково, что инверторы на их основе могут работать во всем диапазоне мощности, которая передается на средних уровнях напряжения, без использования трансформаторов [7].

Пропускная способность линии зависит от ряда параметров, таких, как тепловые потери, зависящие от тока, падение напряжения, зависящие от полного сопротивления, а также потерь на корону, гармонического состава тока и т.д. Наиболее значимыми факторами снижения пропускной способности ЛЭП на средних уровнях напряжения являются падение напряжения и действующее значение тока. В статье рассмотрены методы по-

вышения пропускной способности ЛЭП, способами, которые не связаны с заменой проводов. Сделаны следующие допущения: качество электроэнергии соответствует ГОСТу 32144-2013; в расчетах не учитываются потери на корону, так как на средних уровнях напряжения эффект практически не проявляется за счет относительно небольшой напряжённости поля [8]; ЛЭП переменного тока трехфазные и трехпроводные.

В отличие от ЛЭП переменного тока в постоянном отсутствует реактивная составляющая за счет нулевой частоты. В воздушных ЛЭП доминирующей является реактивное сопротивление, которое зависит от протяженности линии. В случае использования постоянного тока магнитная энергия, запасенная в установившемся режиме, не отдается за счет отсутствия изменения направления тока. За счет этого не возникает опережающей ЭДС в индуктивности, что существенно сказывается на уменьшении падения напряжения.

На рис. 1, а представлена векторная диаграмма, описывающая падение напряжения в ЛЭП переменного тока.

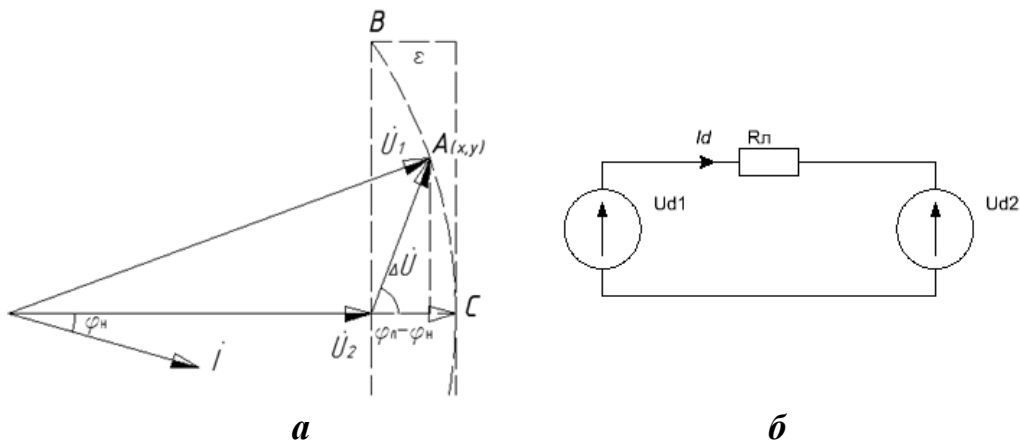


Рис. 1. Падение напряжения в ЛЭП переменного тока: а – векторная диаграмма напряжений ЛЭП переменного тока; б – схема замещения ЛЭП постоянного тока

Из диаграммы следует, что пропускная способность линии ограничивается реактивной составляющей сопротивления. Описывая математически данную векторную диаграмму и производя вычисления, получаем уравнение для активной мощности, которая передается по проводникам переменным током:

$$P = IU_2 \cos(\varphi_H) = k_2 \frac{U_H^2}{|z_L|} \cos(\varphi_H) \cdot \left(\sqrt{k_2^2 \cos^2(\varphi_L - \varphi_H) + k_1^2 - k_2^2} - k_2 \cos(\varphi_L - \varphi_H) \right), \quad (1)$$

где U_H – напряжение нагрузки, В; $\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности нагрузки; k_1 – коэффициент, определяющий величину напряжения в начале линии; k_2 – величина напряжения в конце линии; z_L – полное сопротивление линии электропередачи; z_L – импеданс линии, Ом; φ_H, φ_L – углы сдвига нагрузки и линии соответственно.

Приняв $\cos\varphi_n = 1$, запишем уравнение для передаваемой активной мощности постоянным током

$$P_{\max U} = k_2 \frac{U_H^2}{|z_L|} \cdot \left(\sqrt{k_2^2 \cos^2(\varphi_L) + k_1^2 - k_2^2} - k_2 \cos(\varphi_L) \right). \quad (2)$$

Необходимая реактивная мощность может быть сгенерирована инвертором в точке присоединения нагрузки. При изменении рода тока на постоянный, загруженность линии снижается, так как реактивная мощность забирает часть пропускной способности. Таким образом, возникает возможность увеличения активной мощности, что положительно сказывается на пропускной способности, которая выражается следующей формулой:

$$P_{d \max U} = \frac{U_{d1}U_{d2} - U_{d2}^2}{R_L}, \quad (3)$$

где U_{d1} – напряжение в начале ЛЭП постоянного тока, В; U_{d2} – напряжение в конце ЛЭП постоянного тока, В; R_L – активное сопротивление ЛЭП, Ом. Уравнение составлено согласно следующей схеме (рис 1, б)

Падение напряжения обуславливается током, протекающим в линии, который равен:

$$I_d = \frac{3I_L U_\phi}{U_d} \cos(\varphi), \quad (4)$$

где I_L – линейный переменный ток трехфазной цепи, А; I_d – постоянный ток, А; U_ϕ – фазное напряжение, В.

Электроэнергия в линиях переменного тока передается по трем фазным проводам. При изменении рода тока стоит вопрос о выборе топологии будущей ЛЭП. Существуют несколько видов ЛЭП постоянного тока. Интерес представляет сравнение пропускной способности различных топологий. Наиболее простой способ заключается в замене на униполярную (монополярную) линию. В таком случае используются два провода трехфазной системы. Оценим, во сколько раз увеличивается ток в линии, при тех же параметрах по сравнению с ЛЭП переменного тока:

$$I_d/I_L = \frac{\pi}{16} \cos(\varphi_n) \approx 1,28 \cdot \cos(\varphi_n). \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что переменный ток в линии увеличивается в 1,28 раз. При коэффициенте мощности, равном 0,78 ($\frac{1}{1,28}$), ток в линии не увеличится, при больших коэффициентах мощности передаваемая мощность должна быть уменьшена. При таком переходе изменяется коэффициент запаса линии электропередачи по току, который показывают, во сколько раз ток в линии отличается от максимально допустимого:

$$K_{d3T} = \frac{I_{\max}}{I_d} = \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos(\varphi_n)} \approx \frac{K_{3T}}{1,28 \cos(\varphi_n)}. \quad (6)$$

Обозначим, что $k_1=1,1$; $k_2=0,9$, тогда отношение двух этих величин

$$\frac{P_{d \max U}}{P_{3\phi \max U}} = 0,91 \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}(\varphi_L)^2}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos(\varphi_L)^2 + 0,4 - 0,9 \cos(\varphi_L)}}. \quad (7)$$

По аналогии с (6) введем понятие коэффициента запаса по напряжению K_{3H} , определяемого как отношение пропускной способности линии электропередачи по напряжению к передаваемой активной мощности, который больше или равен 1.

Функцию от угла сдвига фаз в линии $f(\varphi_L)$ запишем так:

$$P_{3\phi \max U} = \frac{P_{d \max U}}{f(\varphi_L)}, \quad (8)$$

следовательно,

$$K_{d 3H} = \frac{P_{d \max U}}{P} = f(\varphi_L) \cdot K_{a 3H} = f(\varphi_L) \cdot \frac{P_{3\phi \max}}{P}. \quad (9)$$

Оба коэффициента определяют, во сколько раз возможно увеличение передаваемой активной мощности, так как для ЛЭП они равноценны, то вводится понятие коэффициента запаса по мощности, который является отношением пропускной способности линии (максимума активной передаваемой мощности) в линии к номинальной активной мощности (рис. 2):

$$K_{3M} = \frac{P_{\max U}}{P} = \min[K_{3T}; K_{3H}]. \quad (10)$$

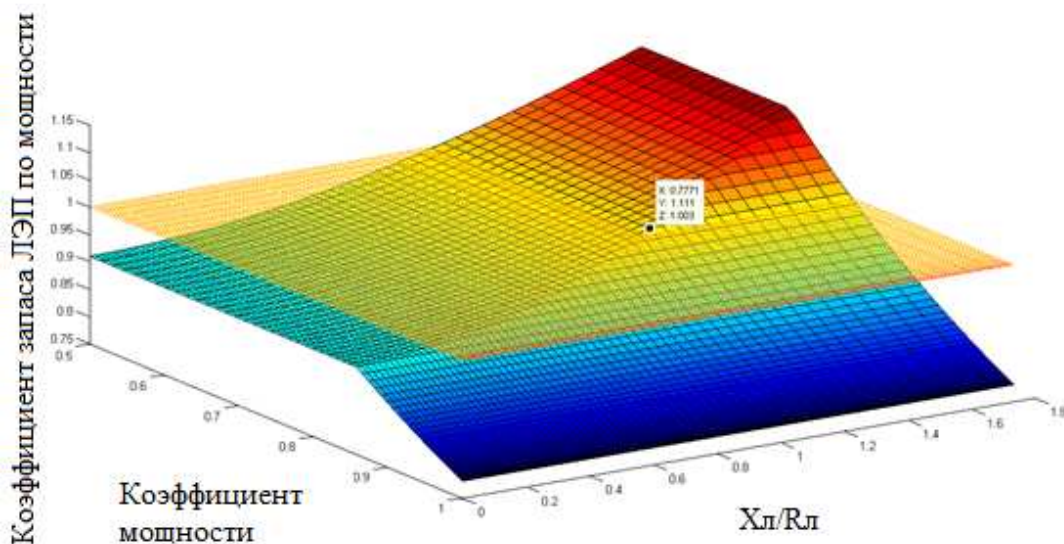


Рис. 2. Зависимость коэффициент запаса мощности от коэффициента мощности нагрузки и отношения реактивного сопротивления ЛЭП к активному

По данному критерию можно определить, в каких случаях коэффициент запаса по мощности больше единицы (верхняя часть графики). Эта и последующие зависимости построены с допущением, что коэффициенты

запаса по току и по напряжению линии электропередачи переменного тока равны единице. При описываемом переходе передаваемая по линии активная мощность может быть увеличена только при коэффициенте мощности нагрузки, меньшем 0,77, и при величине отношения реактивного сопротивления линии электропередачи к активному более, чем 1,11.

Рассмотренный выше способ передачи не является наиболее целесообразным, так как третий провод не задействован. Возможно использование трех проводов в рамках униполярной (или биполярной) ЛЭП постоянного тока [9,10]. Для этого фазы линии переключаются попеременно с определенной частотой. В каждый момент времени задействованы только два из трех проводов. При такой топологии по проводам можно пропустить больший ток за счет того, что критическая температура достигается не сразу, а за некоторое время. Провод переключается, позволяя металлу остыть.

Определим, насколько можно увеличить ток в условиях перегрузки при переключении фаз. Исходя из закона Джоуля-Ленца, а также из условия, что выполняются равенство выделяемой теплоты при работе ЛЭП при постоянном токе и повторно-кратковременном режиме, можно записать следующее:

$$I_d^2 \cdot R_l \cdot T = \frac{2}{3} T \cdot I_{dнк}^2 \cdot R_l, \quad (11)$$

где $I_{dнк}$ – ток ЛЭП постоянного тока, работающий в повторно-кратковременном режиме, А; T – период переключения фаз, с. Определим

$$\frac{I_{dнк}}{I_d} = \sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (12)$$

Коэффициент запаса по току определяется по следующей формуле. Стоит отметить, что параметры ЛЭП по сравнению с предыдущим способом передачи не изменились:

$$K_{d3T} = \frac{I_{max}}{I_{dнк}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos(\varphi_H)} = \frac{3 \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos(\varphi_H)} \approx \frac{K_{3T}}{1,05 \cdot \cos(\varphi_H)}. \quad (13)$$

Коэффициент запаса линии электропередач по напряжению не отличается от предыдущего рассмотренного случая, так как конфигурация проводов осталась прежней.

Из рис. 3 видно, что передаваемая по линии электропередачи активная мощность в основном ограничена по условию падения напряжения. Пропускная способность линии при рассматриваемом переходе определяется ограничением не только по току, но и по напряжению и снижается на величину от 5 до 9 % (в зависимости от реактивного сопротивления ЛЭП). Увеличение потока активной мощности достигается при коэффициенте мощности нагрузки меньшем, чем 0,95, и при величине отношения реактивного сопротивления к активному большей, чем 1,1

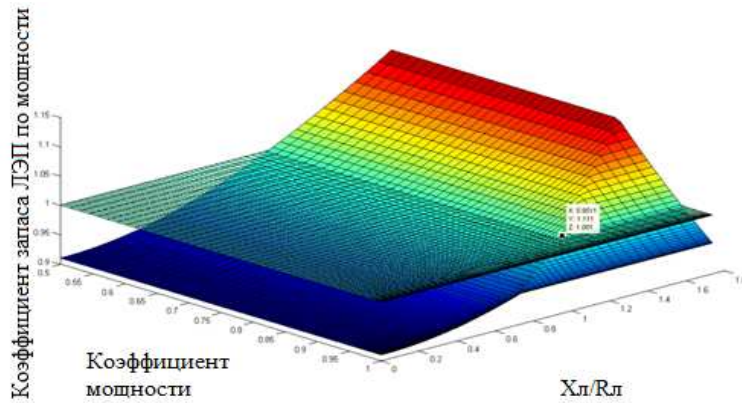


Рис. 3. Зависимость коэффициента запаса мощности двухпроводной линии электропередачи от параметров нагрузки и линии электропередачи при работе в повторно-кратковременном режиме

Также существует способ переключения фаз, при котором задействованы все три провода. В таком случае ток прямой последовательности течет по одному проводнику, а в обратную сторону – по двум. Аналогично предыдущему случаю фаза переключается циклично. Достоинством такого метода является изменение сопротивления в 0,75 раз.

Аналогично определим баланс количества теплоты

$$I_d^2 \cdot R_l \cdot T = \frac{1}{3} T \cdot I_{dнк}^2 \cdot R_l + \frac{2}{3} T \cdot \frac{I_{dнк}^2}{4} \cdot R_l. \quad (14)$$

Отношение тока при таком режиме работы к номинальному току равно корню квадратному из двух. Коэффициент запаса по току линии в описываемом повторно-кратковременном режиме (рис. 4)

$$K_{d3T} = \frac{I_{max}}{I_{dнк}} = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos(\varphi_H)} = \frac{\sqrt{12} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos(\varphi_H)} \approx \frac{K_{3T}}{0,9 \cdot \cos(\varphi_H)}. \quad (15)$$

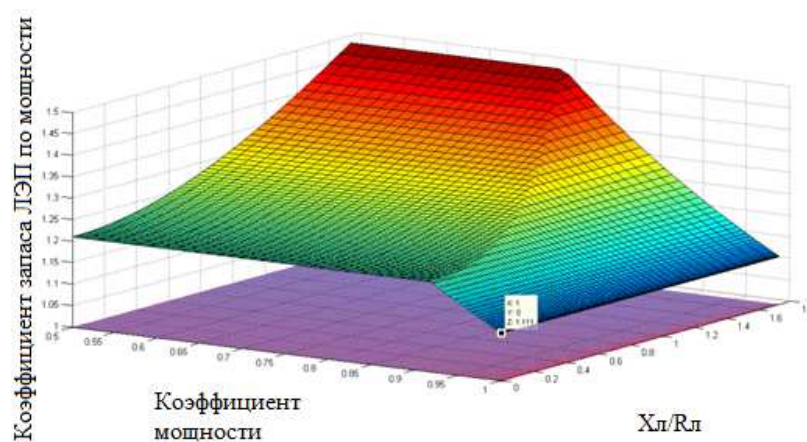


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса трехпроводной линии электропередачи по мощности от параметров нагрузки и линии электропередачи при работе в повторно-кратковременном режиме

Видно, что в последнем случае пропускная способность линии электропередачи, безусловно, увеличивается на одиннадцать процентов. Более того, за счет реактивной мощности и реактивного падения напряжения в линии поток активной мощности может быть увеличен даже больше.

Наличие трех проводов в линии электропередачи переменного тока позволяет реализовывать повторно-кратковременные режимы работы электропередачи, при работе в которых повышается коэффициент запаса линии электропередачи по току.

Вывод

Проведенный анализ дает достаточное основание утверждать, что при переводе трехпроводной линии переменного тока на постоянный без использования возврата по земле оптимальной является передача с использованием трех проводов включенных по схеме «один прямой, два обратных», в повторно кратковременном режиме. Переключение проводов линии электропередачи позволяет перегрузить их по току в 1,41.

Не рассмотренной осталась наиболее перспективная с точки зрения увеличения пропускной способности хомополярная топология ЛЭП постоянного тока. При использовании такой топологии возврат тока происходит через заземление. За счет того, что сопротивление земли крайне мало, прогнозируется значительное снижение падения напряжения на линии. Однако оно связано с некоторыми технологическими сложностями и ограничениями и требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Боков Г. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? // Новости Электротехники. 2002. 2(14). С. 1.
2. Приказ от 1 марта 2016 г. №147 «Об утверждении схемы и программы единой энергетической системы России на 2016-2022 гг.» [Электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.ru/node/5021> (дата обращения 10.04.2017).
3. ФСК ЕЭС История отрасли, электронный ресурс [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/about/history_industry/ (дата обращения 10.04.2017).
4. ООО Проектно-сметное бюро, нормативные документы по воздушным линиям электропередач, электронный ресурс [Электронный ресурс]. URL: http://psb-energo.ru/publ/konsultacii_i_razjasnenija/ehnergetika/vozdushnye_linii_ehlektrperedachi/29-1-0-600 (дата обращения 14.04.2017).
5. Смородин Оценка экономической эффективности мероприятий по увеличению пропускной способности воздушных линий электропередач / А.Я. Бигун, Д.Ю. Шевченко, А.А. Лукачева, Е.С. Сеница, Е.А. Кузнецов, Г.С. // Сборник конференции «VII Всероссийская 60 научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая». Омск, 2015. С. 1 – 5.

6. Ozerdem O.C. Converting a three-phase AC line to a three-wire DC line by a modified converter // *Electr Eng.* 2010. (92). P. 1 – 8.
7. Islam Md. R., Guo Yo., Zhu J. A Multilevel Medium-Voltage Inverter for Step-Up-Transformer-Less Grid Connection of Photovoltaic Power Plants // *IEEE Journal of Photovoltaics.* 2014. Vol. 4. No. 3. P. 1 – 6.
8. Герасимов С.Е., Меркурьев А.Г. Регулирование напряжения в распределительных сетях: учеб. пособие. СПб., 1998. 100 с.
9. Arrillaga Jos. High Voltage Direct Current Transmission. // *IET power and energy series.* London, 2008. Vol. 29. 296 p.
10. Arrillaga Jos, Liu Y.H., Watson N.R. Flexible Power Transitions. The HVDC options. Chichester: John Willey and Sons LTD, 2007. 362 p.

Шклярский Ярослав Элиевич, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, js-10@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Соловьев Сергей Викторович, асп., forsakenfour@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Барданов Алексей Игоревич, асп., xel_13@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет

TRANSLATION OF A THREE-PHASE TRANSMISSION LINE OF MEDIUM VOLTAGE TO A DIRECT CURRENT

Ja. E. Shklyarskiy, S.V. Solovev, A.I. Bardanov

There is an analysis of opportunity of changing current type in medium voltage transmission lines to increase an active power flow is made. A comparison is made between different methods of DC transmission, except with the usage of ground return. The notion of a power reserve factor has been introduced to evaluate and compare the possibility of increasing the capacity and transmitted active power in transmission lines (TL). Received and presented in the form of three-dimensional graphs of the dependence of the power reserve factor on the line parameters and the nature of the load.

Key words: transmission line power capacity, direct current, active power, medium voltage level.

Shklyarskiy Yaroslav Elievich, doctor of technical sciences, docent, head of chair, js-10@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Solovev Sergei Viktorovich, postgraduate, forsakenfour@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Bardanov Alexey Igorevich, postgraduate, xel_13@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University