**Геркусов А.А**

 **Нагрузочные** **Потери мощности в линиях**

 **электропередачи с 2-х сторонним питанием и в кольцевых сетях**

 **Аннотация.** В настоящей работе рассмотрены особенности распределения потерь мощности и электроэнергии в ВЛ 6-35 кВ, имеющих 2-х стороннеее питание, а также в кольцевых сетях такого же напряжения. Предложена методика оптимизации точек разрыва линий с 2-х сторонним питанием с целью снижения потерь мощности и электроэнергии в них. Доказано, что положение точек разрыва таких линий зависит от параметров режима ЛЭП, а также от удельного сопротивление линий и расстояния от питающего центра до нагрузочного узла, который рассматривается для перевода на одностороннее питание. Предложено для снижения потерь мощности при разделении линии на участки с односторонним питанием использовать статические компенсаторы реактивной мощности СТАТКОМ.

 **Ключевые слова.** Линия электропередачи. Узел нагрузки. Потери электроэнергии. Кольцевая сеть. Радиальная сеть. Питающий центр. Надёжность. Сопротивление линии. СТАТКОМ.

 **Введение.** Электрические сети СНГ являются важнейшей инфраструктурной частью одного из самых развитых в мире электроэнергетических комплексов и представляющие собой естественную монополию, регулируемую государством частью рынка электроэнергии, осуществляющую услуги по передаче электроэнергии потребителям и по их технологическому присоединению к электрическим сетям.

 Требования к ЛЭП всё время возрастают, причём в первую очередь в отношении повышения надёжности, увеличения пропускной способности, при одновременном снижении потерь электроэнергии, уменьшения экологического влияния, сокращения полосы отчуждения под строительство. Поиск способов решения указанных проблем, при одновременном улучшении технико-экономических показателей всего электросетевого комплекса, определяет одно из важнейших направлений научно-исследовательских работ в этой области.

 По надёжности электроснабжения электрические сети классифицируют: на разомкнутые с односторонним питанием; разомкнутые с повышенной надёжностью и замкнутые (с двухсторонним питанием и кольцевые) [1]. В разомкнутых сетях повреждение и отключение любой линии приводят к временному прекращению питания энергией соответствующих потребителей до восстановления их нормальной работы. В разомкнутых сетях повышенной надёжности при нарушении питания по одной из ЛЭП производится переключение потребителей на другую линию (как правило с применением устройств АВР) по которой продолжается их электроснабжение. В кольцевых сетях и сетях с двухсторонним питанием, отключение одной линии не приводит к нарушению электроснабжения, так как каждый потребитель может получать питание одновременно по 2-м линиям. Однако в кольцевых сетях и сетях с 2-х сторонним питанием усложняются применяемые устройства РЗА.

 Передача электроэнергии по ЛЭП сопровождается нагрузочными и условно-постоянными потерями, являющимися важнейшим показателем работы сетевой компании. Потери отражают техническое состояние и качество эксплуатации электрических сетей, уровень их морального и технического старения, совершенство систем сбора и учёта информации и прямо влияют на экономические показатели сетевых предприятий.

 Уменьшение потерь электроэнергии в электрических сетях различного назначения – является одним из основных направлений реализации энергосберегающей политики в электроэнергетических системах СНГ, а проведение полного и всестороннего анализа причин, вызывающих потери электроэнергии, является актуальной задачей развития и моделирования энергосберегающих технологий.

 Неоптимальная конфигурация схемы электроснабжения промышленных объектов, агропромышленного комплекса или населённых пунктов неминуемо ведёт к неоправданному росту потерь мощности и электроэнергии [2, 3].

 Несмотря на то, что развитие методологии по влиянию положения точки разделения сети на значения технических потерь электроэнергии актуально и необходимо, научно-исследовательских работ по этой тематике явно недостаточно [2, 3, 4]. Поэтому необходимо дальнейшее развитие и уточнение теоретических основ и методов решения этой важнейшей народно-хозяйственной задачи, позволяющей определять оптимальные точки разделения сетей с 2-х сторонним питанием.

 **Определение точки оптимального разделения линии.** Рассмотрим влияние положения точки раздела линии с 2-х сторонним питанием на величину нагрузочных потерь мощности и электроэнергии в такой ЛЭП.

 **Допущение 1.** *Для упрощения расчётов принимаем, что для ВЛ-6-35 кВ условно-постоянные потери отсутствуют.*

**Допущение 2.** *Принимаем, что напряжение ВЛ в нормальном, установившемся режиме соответствует номинальному напряжению.*

 Пусть мы имеем двухстороннюю электропередачу общей длиной **L** с подключённой нагрузкой **Sн**, заданными длинами участков **L1**и **L2** и заданными сечениями проводов (удельными сопротивлениями) **r1**и **r2**(рис. 1).

 **L=L1 + L2**

 **А 1 L1 L2 4 B**

 **IАС 2 3 ICB**

**Uc**

 **С**

 **IС**

 **Sн = Pн+jQн**

 **Рис. 1. Схема ВЛ-35-110 кВ, осуществляющей 2-х стороннее питание нагрузочного узла**

 Выключатели (1-2-3-4) включены и нагрузка (п.с. «С») получает питание от 2-х источников (подстанции «А» и «В» ).

 Необходимо: *с учётом влияния внешней сети прилегающего энергорайона и изменения параметров его режима в течении суток, выбрать такую точку разделения заданной сети, т.е. расстояние от нагрузочного узла «С» до центра питания «А»,* ***Lx*** *что бы при отключённом выключателе 3 нагрузочные потери электроэнергии на участе ВЛ с уже односторонним питаним «А»-«С» не превосходили бы потерь при 2-х стороннем питании узла «С».*

Согласно *метода наибольших потерь* [5], при условии 2-х стороннего питания нагрузочного узла «С» потери активной мощности в линии **АСВ** $∆P\_{АBC}$ будут выражаться формулой:

$∆P\_{АBC}=∆P\_{AC}+∆P\_{CB}=I\_{AC}^{2}∙r\_{1}∙L\_{1}+I\_{CB}^{2}∙r\_{2}∙L\_{2}$ , **(1)**

которая после ряда преобразований примет вид:

 $∆P\_{АBC}=\frac{I\_{c}^{2}∙r\_{1∙}L\_{1}∙r\_{2}∙L\_{2}}{r\_{1∙}L\_{1}+r\_{2}∙L\_{2}}$ **, (2)**

Где **𝛥PАС,  IАС,  𝛥PСВ, IСВ –** потери мощности и токи в линиях **АС** и **СВ** соответственно; **Ic** – ток, потребляемый нагрузкой «**С**».

 С другой стороны, при аварийном или оперативном отключении выключателя 3 в нагрузочном узле «**С**», линия **АСВ** вырождается в линию с односторонним питанием от п.с. «**А».** При этом меняются и параметры режима, как в линии, так и в энергосистеме в целом (напряжения в узлах, токи, активные и реактивные перетоки мощности в ветвях). Отклонение напряжения от номинального **𝛥U** является одним из основных показателей качества электроэнергии и в нормальном установившемся режиме электрической системы в абсолютных единицах определяется выражением:

 $∆U=U-U\_{н}$ **, (3)**

 Оно связано, как правило, с изменением нагрузки у потребителей и, возникающим в

 следствии этого, нарушением баланса генерируемой и потребляемой в системе активной и реактивной мощности. В результате изменяются токи источников электроэнергии, трансформаторов, межсистемных связей и.т.д. Сверхдопустимые отклонения напряжения (как в сторону увеличения, так и уменьшения) приводят к возникновению дополнительных потерь электроэнергии, ухудшению качества и надёжности работы технологических комплексов вплоть до аварийных режимов, сбою и нарушению работы в системах информатизации и автоматики, ухудшению экономических показателей электротехнических комплексов в целом, негативному воздействию на людей [6, 7, 8].

 Для определения токовой нагрузки линии **«АС»** $I\_{C}^{'}$при питании только со стороны п.с. «**А**» воспользуемся усреднёнными статическими характеристиками нагрузки (СХН) по напряжению [6, 7, 8, 9], представляющие собой зависимости потребляемой мощности приёмника от напряжения. Выражения, определяющие эти зависимости имеют следующий вид:

 ** **(4)**

 где **Pн** и **Qн –** соответственно активная и реактивная мощность потребляемые линией при номинальном напряжении; ***U-*** действующее рабочее напряжение линии.

 Коэффициенты **ap, bp, cp**; **aq, bq, cq**определяют вид статических характеристик нагрузки и зависят от вида и состава нагрузки. Их значение определяется экспериментально или путём подбора аппроксимирующего полинома, например методом наименьших квадратов. Данные коэффициенты должны удовлетворять условиям:

**ap + bp + cp = 1**, **aq+ bq+ cq = 1**. **(5)**

Весьма распространенными являются следующие их наборы:

**ap = 0,45 bp = 0,4 cp = 0,15**

 **aq = 6,7 bq = -15,3 cq = 9,6**

Таким образом, согласно имеющимся СХН, изменение действующего напряжения линии ведёт к изменению потребляемой линией активной и реактивной мощности, а следовательно коэффициента мощности и наибольшего нагрузочного тока, которые могут быть определены соответственно как:

 $I\_{C}^{'}$ $=\sqrt{\frac{\left(P\_{C}^{'}\right)^{2}+\left(Q\_{C}^{'}\right)^{2}}{3U^{2}}}$ **, (6)**

$\left(cos φ\_{c}\right)^{'}=\frac{\left(P\_{C}^{'}\right)^{2}}{\sqrt{\left(P\_{C}^{'}\right)^{2}+\left(Q\_{C}^{'}\right)^{2}}}$ **(7)**

 Подставляя, рассчитанные по формулам (11) и (12) значения $I\_{C}^{'}$в 1-е слагаемое формулы (1), при принятых марке провода и значении  **L1,** получаем потери активной мощности$ (∆P\_{АC})^{'}$ в ВЛ **АС**

 $(∆P\_{АC})^{'}=(I\_{C}^{2})^{'}∙r\_{1}∙L\_{1}$ **(8)**

 Очевидно, что разделение линии **АСВ** на участки с односторонним питанием будет целесообразным при условии выполнения неравенства:

 $(∆P\_{АC})^{'}\leq ∆P\_{АBC}$ **, (9)**

Что может быть достигнуто путём выбора соответствующей длины участка **АС,** принимаемой равной в этом случае ***Lx,*** иназываемой *приведенной длиной*.Подставляя в выражение (4) их значения из (2) и (9) и решая полученное неравенство относительно ***Lx,*** получаем:

 $L\_{x}\leq \left(\frac{I\_{c}}{I\_{c}^{'}}\right)^{2}∙\frac{L\_{1}∙r\_{2}∙L\_{2}}{r\_{1∙}L\_{1}+r\_{2}∙L\_{2}}$ **(10)**

 Другим путём регулирования приведенной длины ***Lx*** и снижения т.о. потерь мощности является воздействие на $I\_{c}^{'}$ с помощью статических тирристорных компенсаторов реактивной мощности с управляемыми вентилями типа СТАТКОМ, что возможно путём регулирования напряжения в точке подключения СТАТКОМа, (например в узле «С»), за счёт изменения его реактивной мощности [10, 11]. При этом нагрузочные потери мощности будут снижаться не только в нормальных режимах в соответствии с графиком нагрузки узла «С», но и в послеаварийных режимах, например при аварийном отключении выключателя 3 на п.с. «В» (рис. 1).

 **Пример.** Пусть задана замкнутая сеть 35 кВ с заданными параметрами линий. Рабочий режим указанной сети был расчитан с помощью програмного комплекса «Энергия» (рис. 2). При отключённом положении устройства СТАТКОМ и обеспеченном 2-х стороннем питании нагрузочного узла 2, со стороны п/ст 1 и со стороны п/ст 2, ток в ветви «1-2», согласно расчётов составит 318,5 А., а при отключении в узле «2» выключателя в сторону линии «2-3» узел нагрузки «2» перейдёт на одностороннее питание от п.с. «**1**» и токовая нагрузка линии «1-2» возрастёт согласно проведенням на модели расчётов до 332,75 А, а напряжение в узле «2» составит 35,776 кВ



 **Рис. 2. Замкнутая распределительная сеть 35 кВ**

 **при отключённом в узле 2 устройстве СТАТКОМ**

 При подключении в нагрузочном узле 2 статического тирристорного компенсатора СТАТКОМ, мощностью 16800 кВАр, как показывают результаты расчёта, приведенные на рис. 3, ток в ветви 1-2 и в нагрузочном узле 2, снизится до 317,5 А, а напряжение в узле 2 составит 36,5 кВ. Одновременно снизятся и потери мощности в линии «1-2».

 Приведенная длина линии «1-2» ***Lx1***,  определяемая по формуле (10), в случае применения в узле 2 устройства СТАТКОМ будет:

$L\_{x1}=\left(\frac{318,5}{317,5}\right)^{2}∙\frac{10∙0,204∙60}{0,204∙10+0,204∙60}=8,626 (км)$**,**

В то время, как без применения СТАТКОМа приведенная длина линии «1-2» ***Lx*** будет:

$L\_{x}=\left(\frac{318,5}{332,7}\right)^{2}∙\frac{10∙0,204∙60}{0,204∙10+0,204∙60}=7,855 (км)$

Следовательно, применение в узловых точках сети устройств СТАТКОМ увеличивает приведенную длину линий, а значит существенно расширяет зону, в которой переход на одностороннее питание нагрузочного узла будет целесообразен с точки зрения снижения потерь мощности в сети.

 Однако, в связи с высокой стоимостью этих устройств, необходимо провести полное технико-экономическое обоснование его проектирования, монтажа и эксплуатации в месте установки.



 **Рис. 3. Замкнутая распределительная сеть 35 кВ**

 **при включённом в работу в узле 2 устройстве СТАТКОМ.**

 **Выводы.** 1. Перевод нагрузочного узла в замкнутых сетях на одностороннее питание может быть рекомендован в случаях, если потери в питающей нагрузку разомкнутой линии будут меньше, чем при питании этого же узла от двух источников.

 2. Применение устройства СТАТКОМ для компенсации реактивной мощности и снижения потерь будет экономически обосновано в случае, если капиталовложения и затраты на его эксплуатацию и ремонт будут меньше стоимости потерь электроэнергии, покрываемых СТАТКОМом.

 3. Надёжность электроснабжения нагрузочного узла должна обеспечиваться применением современных устройств релейной защиты противоаварийной автоматики (АПВ и АВР).

 Для наиболее полной реализации предложенной в настоящей работе методики рекомендуется: 1) оценить приведенную длину линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше при различных уровнях загрузки указанных ЛЭП с учётом потерь электроэнергии на корону и в линейной изоляции линий. 2) Провести оптимизационные расчёты удельных дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию ЛЭП 220 кВ и выше, что позволит выбрать оптимальную приведенную длину ***Lx*** участка линии, планируемого к переводу на одностороннее питание.

 **Литература.**

1. Электрические системы. Электрические сети. под ред. В.А. Веникова Т 2 М.:

“ Высшая школа” 1986 г.

1. Путилова Н.Н., Проскурякова М.М. Снижение потерь электроэнергии – важнейший путь повышения энергоэффективности предприятий электрических сетей. // Бизнес. Образование. Право. №4(33), 2015. С. 120-124.
2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчётов. “Издательство НЦ ЭНАС”, 2009 г. 456 с.
3. Сафонов Д.Т., Лютаревич А.Г., Долингер С.Ю., Бирюков С.В. Влияние отклонения напряжения на потери мощности в электрооборудовании электрических сетей и потребителей. Омский научный вестник № 2, (120), 2013. С. 178-183.
4. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В*.* Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях М. “Издательство НЦ ЭНАС”, 2005 г. 277 с.
5. Петрова Е. Г. Определение потери мощности при потере напряжения в радиальных сетях с учётом характеристик нагрузки и других параметров электрических систем МЭИ 1996 г. 13 с.
6. Геркусов А.А. Оптимизация потерь электроэнергии передаваемой по воздушным линиям напряжением 110 кВ и выше. Научно-технические ведомости СПбГПУ № 1 (214) 2015 с. 89-96.
7. Лисина Л.Ф. Балансы реактивной мощности и их составляющие. Вестник Ангарской государственной технической академии № 7 2013. С 62 – 67.
8. Воротницкий В. Э., Рабинович М. А., Краковский С. К. Оптимизация режимов электрических сетей 220 – 750 кВ по реактивной мощности и уровням напряжения. // Энергия единой сети, 2013, № 3(8), с. 50 -59.
9. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем М. : Издательство МЭИ, 2012 г. 335 с.
10. Горожанкин П. А., Майоров А.В., Макаровский С.Н., Рубцов А.А. Управление напряжением и реактивной мощностью в электроэнергетических системах. Европейский опыт. // Электрические станции, 2008. № 6, С. 40 – 47.