

УДК 621.311

П.Ф. Буданов, Э.Т. Красовская

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЛИНИЙ

Исследуется влияние параметров передачи на величину передаваемой по линиям мощности. Пропускная способность относительно коротких линий ограничивается только активным сечением провода и допустимым перепадом напряжения вдоль линии. Пропускная способность дальних электропередач ограничивается в основном волновым сопротивлением линий. Показана возможность регулирования тока (передаваемой мощности) путём регулирования эквивалентных параметров линии с помощью специальных компенсирующих устройств. При передаче мощности меньше натуральной наибольшая избыточная реактивная мощность линии соответствует режиму холостого хода. При этом необходимо обеспечить компенсацию реактивной мощности только части волновой длины превышающей  $k\lambda$  или недостающей до  $k\lambda$ . Чем больше волновая длина линии, тем меньше относительная длина участка линии, избыточную мощность которой необходимо компенсировать. Если волновая длина больше  $k\lambda$ , компенсацию участка линии, превышающего  $k\lambda$ , необходимо осуществлять управляемыми шунтирующими реакторами. Компенсацию реактивной мощности недостающего до  $k\lambda$  участка – источниками реактивной мощности. Передача мощности на дальние расстояния свыше натуральной мощности неэффективна.

**Ключевые слова:** электропередача, пропускная способность, натуральная мощность, компенсация, шунтирующий реактор, источник реактивной мощности, волновое сопротивление.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

Линии электропередачи переменного тока обеспечивают возможность передачи электроэнергии на любые расстояния. Одно из основных требований, предъявляемых к электропередаче, линия должна обеспечивать передачу заданной мощности в нормальном и послеаварийном режимах. При этом в нормальном режиме необходимо обеспечить наиболее экономичную передачу электроэнергии, соответствующую минимуму приведенных к одному году затрат на сооружение и эксплуатацию линии. В послеаварийном режиме передаваемая мощность может значительно возрастать.

Пропускная способность относительно коротких линий ограничивается только активным сопротивлением проводов и допустимым перепадом напряжения вдоль линии. При необходимости повышения пропускной способности линий применяются технические решения, связанные с установкой компенсирующих устройств, ведутся разработки по использованию расщеплённых проводов, включая линии высокого напряжения вплоть до 220 кВ.

Пропускная способность длинных линий ограничивается в основном волновым сопротивлением линий и, соответственно, натуральной мощностью.

При передаче натуральной мощности линии любой длины не нуждаются в дополнительных компенсирующих устройствах. Натуральный режим работы линии характерен тем, что он обеспечивает самокомпенсацию линии, в этом случае передаваемая мощность равна потребляемой нагрузке. При передаче мощности, большей или меньшей натуральной, в начале и в конце линии должны быть источники реактивной мощности. Наиболее технически совершенным и экономически выгодным является натуральный режим передачи энергии по линиям любой длины и любого класса напряжения.

Для обеспечения высокой степени надёжности работы энергосистем в аварийных режимах, связанных с отключением отдельных ЛЭП, целесообразно передавать энергию по линиям в донатуральном режиме ( $P \approx 0,8P_n$ ), это характерно и для распределительных сетей. Передача мощности сверх натуральной по длинным питающим линиям вызывает увеличение перепада напряжения вдоль линии, существенное увеличение потерь энергии в сетях.

Любая необходимая передаваемая по одной цепи линии мощность может быть передана либо в режиме естественной пропускной способности, либо в режиме искусственной пропускной способности. Выбор режима должен быть основан на анализе характеристик этих режимов.

Актуальной является задача исследования влияния электрических параметров линии на регулирование передаваемой мощности и на поддержание натурального режима передачи мощности. Если ток в линии не совпадает с натуральным, реактивная мощность линии определяется соотношением

$$Q = P_n \left[ 1 - (P/P_n)^2 \right] \cdot \lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – волновая длина линии.

При токе, меньшем натурального значения, на линии имеется избыток реактивной мощности, при токе, большем натурального, линия потребляет реактивную мощность и линия нуждается в источнике реактивной мощности, определяемой формулой (1), но с обратным знаком. В связи с тем, что напряжение на линии изменяется в разных режимах работы передачи, изменяется и натуральная мощность линии. Различие характеристик коротких линий высокого и сверхвысокого напряжения определяется различием отношения  $R/X$ . Естественная пропускная способность коротких линий сильно зависит от перепада напряжения и активного сопротивления, индуктивное и, соответственно, волновое сопротивление не оказывают заметного влияния на пропускную способность линий. При этом регулировать передаваемую мощность можно путём изменения перепада напряжения, например, с помощью регулирования напряжения на генерирующей станции, т.е. без применения каких-либо компенсаторов реактивной мощности. Поскольку при выдаче максимальной мощности выдача реактивной мощности генераторов ограничена, ограничена и величина передаваемой по линии активной мощности. Предельная длина линии по условию ограничения выдаваемой источником реактивной мощности быстро уменьшается при увеличении отношения  $P/P_n$ . При необходимости передачи реактивной мощности по линии полезны мероприятия по снижению индуктивного сопротивления линии.

Расчёты [1] показывают, что различие характеристик коротких линий высокого и сверхвысокого напряжения определяется различием отношения  $R/X$ . Для линий сверхвысокого напряжения отношение  $R/X < 0,3$ , что приводит к определяющему влиянию индуктивного сопротивления.

Иной результат получается для очень длинных линий. В зависимости от угла между векторами напряжений по концам линий естественная пропускная способность линий сверхвысокого напряжения без потерь определяется либо как для коротких линий, либо индуктивным (волновым) сопротивлением и, соответственно, их натуральной мощностью. Чем больше отношение  $R/X$ , тем уже области эффективности мероприятий по снижению волнового сопротивления.

В режиме холостого хода линий должны быть

обеспечены требования ограничения перепада напряжения [2] во избежание повреждения изоляции линии и оборудования. Из-за повышения напряжения и увеличения тока холостой режим работы линии в общем случае невозможен. Предельная длина линии определяется допустимыми значениями напряжения и тока.

Установка реактора на конце линии позволяет решить проблему ограничения перепада напряжения вдоль линии и тока, потребляемого от источника. Мощность реакторов увеличивается при увеличении длины линии. Анализ распределения напряжения и тока вдоль линии показывают, что распределение напряжения сильно зависит от перепада напряжения вдоль линии. При наличии реактора на конце линии максимальное повышение напряжения по середине линии во много раз меньше, чем при отсутствии реактора. Зарядный ток линии потребляется на обоих её концах. При отсутствии реактора в конце линии ток в начале достигает максимума, т.е. режим тока холостого хода не накладывает дополнительных ограничений на длину участка линии с реактором на конце.

При необходимости передачи электроэнергии на расстояние, превышающее предельную длину линии, проблема компенсации зарядной мощности линии может быть решена путём установки реакторов в промежуточных точках. Режим холостого хода длинных линий может быть обеспечен при применении компенсирующих устройств только по их концам, как с помощью реактора, так и с помощью источника реактивной мощности (ИРМ). Регулируемое потребление реактивной мощности в настоящее время практически не обеспечено. Шунтирующие реакторы с переменной мощностью УШР только начинают применяться в энергосистемах. Применяются в основном нерегулируемые шунтирующие реакторы. При этом невозможно обеспечить необходимое потребление реактивной мощности при любом режиме электропередачи. Это приводит к существенным техническим осложнениям. Перепады напряжения выходят за пределы допустимых норм. При отсутствии специальных компенсирующих устройств на линии генерация или потребление реактивной мощности компенсируется генераторами или отправной системой.

Увеличение пропускной способности линии при использовании емкостной компенсации в конце линии не зависит от перепада напряжения, а определяется только допустимым отношением  $Q_{\text{потр}}/P_{\text{ген}}$  и отношением  $R/X$  линии. Результаты расчётов [1] показывают, что при  $R/X > 1 \div 1,5$  увеличение пропускной способности незначительно. При  $R/X < 1$  источник реактивной мощности (ИРМ) на конце линии обеспечивает значительное увеличение пропускной способности линии.

Отсюда следует, что увеличение пропускной способности линии зависит от отношения индуктивного сопротивления линии к эквивалентному емкостному сопротивлению на конце линии. Согласно [1] чем больше отношение активного и реактивного сопротивлений линии, тем меньше допустимое отношение  $X/X_C$  и меньше возможное увеличение передаваемого активного тока. Объясняется это тем, что чем меньше индуктивное сопротивление линии по сравнению с активным, тем больше требуется емкостной ток для компенсации падения напряжения на активном сопротивлении линии.

Анализ литературы позволяет сделать следующие выводы:

- в режиме передачи мощности потоки реактивной мощности зависят от отношения  $P/P_H$ , длины линии и отношений напряжения в начале и в конце линии к номинальному напряжению. Характер распределения отношений токов реактивного к активному току существенно различен для случаев  $P/P_H > 1$  и  $P/P_H < 1$ .

- исходя из условий работы линий электропередачи под нагрузкой и в режиме холостого хода, необходимо использование регулируемых источников реактивной мощности или реакторов для компенсации потребления или генерации линией реактивной мощности.

**Целью** статьи является оценка параметров дальних электропередач с управляемыми реакторами в промежуточных пунктах, влияния места установки управляемых реакторов и эквивалентных параметров линии на величину передаваемой мощности.

### Основной материал

Электропередачи длиной свыше предельной по условию перепада напряжения в режиме холостого хода снабжаются реакторами, изменяющими характеристики электропередач. Определим основные параметры электропередачи с управляемыми реакторами, равномерно распределёнными вдоль линии так, что избыточная мощность электрического поля полностью компенсируется реакторами в каждой точке линии. Тогда избыточная мощность  $P \leq P_H$  определяется соотношением (1), поэтому необходимая мощность реакторов при любой мощности  $P$  определяется той же формулой (1). Нескомпенсированная реакторами мощность электрического поля линии равна

$$Q'_{эл} = P_H \cdot (P/P_H)^2 \cdot \lambda = 3U_{\phi}^2 \cdot C U_{\phi}^2 \cdot (P/P_H)^2 \cdot \lambda. \quad (2)$$

Мощность нескомпенсированного электрического поля линии

$$Q_{эл} = P_H \cdot \lambda = 3U_{\phi}^2 \cdot v_B \cdot C \cdot \lambda. \quad (3)$$

Сравнение формул (2) и (3) позволяет определить нескомпенсированную ёмкость линии (эквивалентную ёмкость компенсированной реакторами линии)

$$C_3 = (P/P_H)^2 \cdot C. \quad (4)$$

Индуктивность компенсированной шунтирующими реакторами линии остаётся неизменной, поэтому эквивалентное волновое сопротивление линии в соответствии с (4) равно

$$Z_{B,3} = \sqrt{\frac{L}{C_3}} = \frac{P_H}{P} \cdot Z_B. \quad (5)$$

Это означает, что при уменьшении передаваемой мощности от  $P_H$  до нуля эквивалентное волновое сопротивление линии увеличивается от  $Z_B$  до бесконечности. Соответственно, эквивалентная волновая длина линии изменяется пропорционально передаваемой мощности и при  $P=0$   $\lambda_3 = 0$ , т.е. в режиме холостого хода напряжение по всей длине совпадает по модулю и по фазе. Но при  $P = P_H$  эквивалентная волновая длина линии равна волновой длине нескомпенсированной линии.

Таким образом, как и волновое сопротивление, волновая длина линии с компенсированной зарядной мощностью изменяется в широких пределах при изменении передаваемой мощности.

Результатом такого изменения эквивалентных параметров линии является изменение её натуральной мощности в соответствии с изменением передаваемой мощности  $P$ :

$$P_{H,3} = 3U_{\phi}^2 / Z_{B,3} = (P/P_H) \cdot P_H = P. \quad (6)$$

Это означает, что любая мощность в пределах  $0 \leq P \leq P_H$  передаётся в натуральном режиме, что определяет особые свойства такой линии:

- при любой передаваемой мощности напряжение вдоль линии не меняется;

- линия при любой передаваемой мощности работает с согласованной нагрузкой, т.е. эквивалентное волновое сопротивление равно сопротивлению нагрузки.

Следовательно, при анализе режимов работы длинных линий необходимо использовать не физические их параметры, а эквивалентные, которые в зависимости от передаваемой мощности могут изменяться в широких пределах.

Полученные эквивалентные параметры линий соответствуют линии с равномерно распределённой компенсацией избыточной зарядной мощности, исключающей протекание вдоль линии потоков реактивной мощности. В связи с тем, что в реальных условиях реакторы могут устанавливаться на расстоянии до 600 км один от другого, необходимо оценить возможные поправки к волновым параметрам идеализированной линии.

Неизменное отношение  $U_1/U_2$  при росте  $P$  может быть обеспечено только путём изменения компенсации реактивной мощности на конце линии. При заданном отношении модулей напряжения, и пренебрегая активным сопротивлением линии, определяем отношение  $Q_2/P_H$  [1]:

$$\frac{Q_2}{P_H} = \frac{1}{\sin \lambda} \left[ \pm \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \cdot \sin^2 \lambda} - \cos \lambda \right]. \quad (7)$$

Максимальное отношение передаваемой по линии мощности в натуральном режиме достигает предела  $P_2 = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{P_H}{\sin \lambda}$ . Чем меньше волновая длина

линии, тем больше можно передать по линии мощность при заданной натуральной мощности. Между реактивными мощностями в начале и в конце линии (участка) имеется вполне определённая связь. При равенстве напряжений  $U_1$  и  $U_2$  потоки реактивной мощности на обоих концах участка равны и противоположны. Под нагрузкой обычно поддерживают номинальное напряжение на приёмном конце линии.

Результаты расчётов для двух крайних режимов позволяют сделать вывод о том, что в диапазоне передаваемых по линии мощностей  $0 \leq P \leq P_H$  для уменьшения отношения  $U_1/U_2$  необходимо увеличить мощность компенсирующих устройств (реакторов) в начале линии и, соответственно, уменьшить в конце.

Напротив, в диапазоне  $1 \leq P/P_H \leq U_2/U_1 \cdot \sin \lambda$  для уменьшения отношения  $U_1/U_2$  необходимо уменьшить мощность ИРМ в начале линии и увеличить в конце. Для того, чтобы удерживать отношение  $U_1/U_2$  в пределах  $1 \pm 0,5$ , отношение  $Q_1/Q$  (и, соответственно,  $Q_2/Q$ ) не должно выходить за пределы 0,4–0,6.

#### АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДОВГИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ПРОПУСКНУ СПРОМОЖНІСТЬ ЛІНІЙ

П.Ф. Буданов, Е.Т. Красовська

*Досліджується вплив параметрів передачі на величину передаваної по лініях потужності. Пропускна спроможність щодо коротких ліній обмежується тільки активним перетином дроту і допустимим перепадом напруги уздовж лінії. Пропускна спроможність дальніх електропередач обмежується в основному хвильовим опором ліній. Показана можливість регулювання струму (передаваної потужності) шляхом регулювання еквівалентних параметрів лінії за допомогою спеціальних компенсуючих пристроїв. При передачі потужності менше натуральної найбільша надмірна реактивна потужність лінії відповідає режиму холостого ходу. При цьому необхідно забезпечити компенсацію реактивної потужності тільки частини хвильової довжини, що перевищує  $k\pi$  або бракуючої до  $k\pi$ . Чим більше хвильова довжина лінії, тим менше відносна довжина ділянки лінії, надмірну потужність якої необхідно компенсувати. Якщо хвильова довжина більша, компенсацію ділянки лінії, що перевищує, необхідно здійснювати керованими шунтуючими реакторами. Компенсацію реактивної потужності ділянки, що не дістає до  $k\pi$  – джерелами реактивної потужності. Передача потужності на дальні відстані зверху натуральної потужності неефективна.*

**Ключові слова:** електропередача, пропускна спроможність, натуральна потужність, компенсація, шунтуючий реактор, джерело реактивної потужності, хвильовий опір.

#### ANALYSIS OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF LONG LINES OF ELECTRICITY TRANSMISSION ON CARRYING CAPACITY OF LINES

P.F. Budanov, E.T. Krasovskaya

*Influence of parameters of transmission on the size of transferrable on lines power is probed. A carrying capacity in relation to short lines is limited to only the active section of wire and possible overfall of tension along a line. The carrying capacity of distant electricity transmissions is limited to mainly the impedance of lines. Possibility of adjusting of current (to transferrable power) is rotined by adjusting of equivalent parameters of line by the special compensating devices. At passing to power less than natural the most surplus reactive-power of line corresponds the mode of idling. It is thus necessary to provide indemnification a reactive-power only parts of wave length exceeding  $k\pi$  or failing to  $k\pi$ . What anymore wave length of line, the less than relative length of area of line surplus power of which must be compensated. If wave length anymore, indemnification of area of line, exceeding, it is necessary to carry out the guided bypass reactors. Indemnification the reactive-power of desideratum to  $k\pi$  the area – by the sources of reactive-power. Passing to power on distant distances above of natural power is uneffective.*

**Keywords:** electricity transmission, carrying capacity, natural power, indemnification, bypass a reactor, source of reactive-power, impedance.

#### Выводы

Чем длиннее линия без промежуточных присоединений к энергосистеме, тем менее экономичен режим передачи малых мощностей, так как он связан с протеканием по линии значительных реактивных токов. В качестве межсистемных связей с переменным потоком мощности целесообразно использовать линии с промежуточными УШР, потребляющими избыточную реактивную мощность вблизи зоны её генерации. При этом по содержанию реактивной составляющей в среднеквадратичном токе вдоль линии длинная линия оказывается эквивалентной линии, длина которой равна участку линии между двумя соседними УШР.

Выполненный анализ позволяет выбрать наиболее целесообразный вариант электропередачи при любой её длине и любом графике нагрузки линии.

#### Список литературы

1. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током / Г.Н. Александров. – М.: Знак, 1998. – 242 с.
2. Буданов П.Ф. Регулирование напряжения на длинных ЛЭП с помощью управляемых шунтирующих реакторов / П.Ф. Буданов, Э.Т. Красовская // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 3(70). – С. 97-101.

Поступила в редколлегию 30.11.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук Г.И. Канюк, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.