

УДК 621.311

Э.Т. Красовская, П.Ф. Буданов

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ДЛИТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

Исследуется влияние степени компенсации зарядной мощности линий электропередачи, волновых параметров линии на величину перенапряжения промышленной частоты, на условия работы генераторов и устройств ограничения перенапряжений. В результате анализа волновых уравнений линий электропередачи установлена основная причина длительных перенапряжений промышленной частоты, определена зависимость уровня напряжений от величины передаваемой мощности, степени компенсации зарядной мощности линий, волновых параметров схемы. Применение мер ограничения длительных перенапряжений в режимах малой нагрузки исключает возможность глубокого ограничения вынужденной составляющей коммутационных перенапряжений. Показано, что наиболее целесообразным и экономичным способом решения этой проблемы является применение управляемых шунтирующих реакторов, позволяющих обеспечить компенсацию избыточной реактивной мощности линий в любом режиме их работы.

**Ключевые слова:** электропередача, электростанция, волновые параметры, изоляция, перенапряжения, пропускная способность, компенсация, шунтирующий реактор.

### Введение

**Постановка проблемы.** Одной из основных задач электроэнергетики является ограничение грозовых и коммутационных перенапряжений, поскольку это позволяет значительно облегчить условия работы изоляции. Изоляция в электрических сетях, в первую очередь, определяется условием надежной работы при воздействии рабочего напряжения, поэтому в идеальном случае перенапряжения должны быть ограничены до такого уровня, при котором они не оказывали бы влияния на изоляцию – ее размеры и качество.

Особого внимания требует исследование условий ограничения внутренних перенапряжений. Различают длительные перенапряжения промышленной и повышенной частоты и кратковременные, коммутационные перенапряжения.

Длительные перенапряжения возникают, как правило, из-за наличия избыточной зарядной мощности в электрических сетях. Исключить появление таких перенапряжений в настоящее время невозможно, так как при полной компенсации и малых нагрузках линий резко ограничивается их пропускная способность. Поэтому обычно допускается 60% компенсация зарядной мощности линий. Недоста-

точная компенсация реактивной мощности линий приводит к возникновению опасных феррорезонансных перенапряжений.

Неполная компенсация избыточной реактивной мощности определяет и повышенную вынужденную составляющую коммутационных перенапряжений.

Переходная составляющая коммутационных перенапряжений снижается при ограничении вынужденной составляющей, кроме того, ограничение вынужденной составляющей позволяет обеспечить более глубокое ограничение переходной составляющей с помощью ограничителей перенапряжений.

Оценка необходимых параметров защитных устройств и ограничение избыточной зарядной мощности линий определяет актуальность работ по ограничению как длительных, так и коммутационных перенапряжений.

**Анализ литературы.** При отклонении режима передачи мощности от натурального возникает дисбаланс мощностей электрического и магнитного полей, что определяет генерацию или потребление реактивной мощности линией электропередачи. Если передаваемая мощность меньше натуральной, линия генерирует реактивную мощность. Для компенсации избыточной реактивной мощности линии

используются генераторы, синхронные компенсаторы, батареи конденсаторов, реакторы и статические тиристорные компенсаторы [1].

Генераторы практически не имеют ограничения на генерацию реактивной мощности, т.е. они могут использоваться для компенсации избыточной реактивной мощности при  $P > P_H$ . Однако потребление генераторами реактивной мощности ограничено.

Синхронные компенсаторы обеспечивают компенсацию избыточной реактивной мощности линии электропередачи, как в режиме генерации его реактивной мощности, так и в режиме ее потребления. Однако мощность синхронных компенсаторов ограничена и, кроме того, они дороги и требуют больших расходов на их эксплуатацию.

Батареи конденсаторов обеспечивают компенсацию только потребления линией реактивной мощности.

Статические тиристорные компенсаторы обеспечивают компенсацию избыточной реактивной мощности во всех режимах работы линий, но они дороги.

Шунтирующие реакторы обеспечивают компенсацию избыточной реактивной мощности линий только при  $P < P_H$ . Это наиболее дешевое устройство. Однако, невозможность изменения их мощности при изменении режима работы электропередачи приводит к серьезным проблемам.

Наиболее целесообразное решение проблемы компенсации избыточной реактивной мощности линий заключается в применении регулируемых реакторов, мощность которых изменяется в зависимости от передаваемой по линии мощности. Установка управляемых реакторов [2] не ограничивает естественную пропускную способность линии, определяемую их натуральной мощностью, 100% компенсации зарядной мощности линий исключает необходимость потребления избыточной реактивной мощности генераторами и, следовательно, обеспечивает значительное снижение перегревов лобовых частей статоров.

Известно, что модуль э.д.с.  $E$  генератора уменьшается при уменьшении отношения  $P/P_H$ . По достижении э.д.с. генераторов  $E$  величины напряжения на их зажимах наступает неблагоприятный режим работы. Поэтому на атомных станциях, где к генераторам предъявляются повышенные требования по надежности, не допускается снижение э.д.с. меньше напряжения на их зажимах, а на прочих станциях допускают снижение надежности работы генераторов, принимая в качестве нижнего предела  $E = 0,85 U_{\phi,н}$ . Определено, при каком отношении передаваемой мощности к натуральной мощности линии достигается предельная величина  $E = kU_{\phi,н}$

( $k = 1$  или  $k = 0,85$ ). Критическое отношение  $P/P_H$  для линий разной длины соответствует реальным режимам нагрузки линий. После достижения критического значения  $E$  регулирование тока возбуждения прекращается, э.д.с.  $E$  сохраняется неизменной, а напряжение в начале линии может достигать неприемлемых величин.

По этой причине на линиях устанавливаются шунтирующие реакторы для компенсации избыточной реактивной мощности линий. В [3] подтверждена эффективность применения управляемых шунтирующих реакторов для регулирования напряжения вдоль всей линии электропередачи.

**Целью статьи** является исследование зависимости величины напряжения в начале линии от передаваемой мощности и волновой длины линий, влияния шунтирующих реакторов на волновые параметры линий, влияния степени компенсации избыточной зарядной мощности линий электропередачи на величину внутренних перенапряжений.

### Основной материал

Рассмотрим простейшую схему электропередачи, содержащую источник напряжения промышленной частоты с его синхронным сопротивлением  $X_s$ , линию электропередачи произвольной длины  $l$  и приемную энергосистему, имитируемую нагрузкой  $S$ , отнесенной к натуральной мощности линии

$$P_H = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z} = \frac{3U_{\phi,н}^2}{Z}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное линейное напряжение линии;  $U_{\phi,н}$  – ее номинальное фазное напряжение;  $Z$  – ее волновое сопротивление.

Связь между напряжением и током в начале длинной линии с напряжением и током в конце линии при чисто активной нагрузке определяется волновыми уравнениями

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= U_2 \cos \lambda + jI_2 Z \sin \lambda = \\ &= U_2 \left( \cos \lambda + j \frac{P}{P_H} \frac{U_{\phi,н}}{U_2} \sin \lambda \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= I_2 \cos \lambda + j \frac{U_2}{Z} \sin \lambda = \\ &= \frac{U_2}{Z} \left( \frac{P}{P_H} \frac{U_{\phi,н}}{U_2} \cos \lambda + j \sin \lambda \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где вектор напряжения на приемном конце линии совмещен с осью вещественных величин,  $\lambda = \omega \frac{l}{v}$  – волновая длина линии, а ток в линии подставляем в виде

$$I_2 = \frac{U_{\phi,н}}{Z} \frac{P}{P_H}. \quad (4)$$

Если э.д.с. источника напряжения равна  $\bar{E} = \bar{U}_1 + j X_s \bar{I}_1$ , то модуль э.д.с. за синхронной индуктивностью системы  $X_s$  равен

$$\bar{A} = \sqrt{U_2^2 (\cos \lambda - \alpha \sin \lambda)^2 + U_{\delta.i}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 (\sin \lambda + \alpha \cos \lambda)^2}. \quad (5)$$

Согласно (2) модуль  $U_1$  равен

$$U_1^2 = U_2^2 \cos^2 \lambda + U_{\phi.n}^2 \left[\frac{P}{P_H}\right]^2 \sin^2 \lambda, \quad (6)$$

откуда

$$U_2 = \sqrt{\frac{U_1^2 - U_{\phi.n}^2 \left[\frac{P}{P_H}\right]^2 \sin^2 \lambda}{\cos^2 \lambda}}. \quad (7)$$

Подставляя  $U_2$  согласно (7) в (5), получаем

$$E = \left\{ \left[ U_1^2 - U_{\phi.n}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right) \sin^2 \lambda \right] (1 - \alpha \operatorname{tg} \lambda)^2 + \left[ U_{\phi.n}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 (\sin \lambda + \alpha \cos \lambda)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} = \left\{ U_1^2 (1 - \alpha \operatorname{tg} \lambda)^2 + U_{\phi.n}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \alpha \left[ \alpha (1 - \operatorname{tg}^2 \lambda) + 2 \operatorname{tg} \lambda \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

При малых нагрузках линии напряжение в конце линии  $U_2$  повышается по отношению к напряжению в ее начале  $U_1$ . Поэтому в этом режиме с помощью регулятора возбуждения генераторов снижают напряжение в начале линии до номинального, и при анализе режима малых нагрузок можно принять  $U_1 = U_{\phi.n}$ .

Уравнение (8) позволяет проследить за изменением напряжения в начале линии (при  $E = k U_{\phi.n}$ ):

$$\frac{U_1}{U_{\phi.n}} = \sqrt{\frac{k^2 - \alpha \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 [\alpha (1 - \operatorname{tg}^2 \lambda) + 2 \operatorname{tg} \lambda]}{1 - \alpha \operatorname{tg} \lambda}}. \quad (9)$$

Результаты расчетов показали, что напряжение в начале линии может достигать неприемлемых величин при уменьшении отношения  $\frac{P}{P_H}$  меньше критического для линий достаточно распространенной длины  $\lambda$  при допустимой величине э.д.с.

По этой причине на линиях устанавливаются шунтирующие реакторы. При этом волновые параметры линий изменяются, иной вид принимают волновые уравнения линии, следовательно, и модуль э.д.с.

$$E = \left\{ U_2^2 (\cos \lambda \sqrt{1 - \beta} - \alpha \sqrt{1 - \beta} \sin \lambda \sqrt{1 - \beta})^2 + \left[ U_{\phi.n}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \left( \frac{\sin \lambda \sqrt{1 - \beta}}{\sqrt{1 - \beta}} + \alpha \cos \lambda \sqrt{1 - \beta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (10)$$

где  $\beta$  – коэффициент, характеризующий степень компенсации зарядной мощности линии,  $\beta = Q / P_H \lambda$ .

Из волновых уравнений линии находим модуль напряжения  $U_1$ :

$$U_1 = \sqrt{U_2^2 \cos^2 \lambda \sqrt{1 - \beta} + U_{\delta.i}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \frac{\sin^2 \lambda \sqrt{1 - \beta}}{1 - \beta}}. \quad (11)$$

Выражаем  $U_2$  через  $U_1$  и подставляя  $U_2$  в (10), получаем модуль э.д.с., в предельном случае  $\beta = 1$  модуль э.д.с.

$$E = \sqrt{U_1^2 + U_{\phi.n}^2 \left(\frac{P}{P_H}\right)^2 \alpha (2\lambda + \alpha)}. \quad (12)$$

Откуда при  $P=0$  э.д.с.  $E = U_1$ . Это означает, что при любой длине линии и любом индуктивном сопротивлении системы  $X_s$  э.д.с.  $E \geq U_1$ , что определяет благоприятные условия работы генераторов. Однако, при  $\beta = 1$  пропускная способность линии значительно меньше ее натуральной мощности при длинах линии более 300 км [1]. Поэтому такая степень компенсации не допускается.

Как правило, в электрических сетях допускается степень компенсации зарядной мощности линий около 60%. В таком случае при  $U_1 = U_{\phi.n}$ :

$E = k U_{\phi.n}$  ( $k = 1; k = 0,85$ ); характер зависимости  $\frac{P}{P_H}$  существенно изменяется.

При  $\lambda < 1$  рад критические отношения  $\frac{P}{P_H}$  значительно меньше, чем при отсутствии компенсации зарядной мощности линий, а при относительно малых длинах линий ( $\lambda < 0,15$  рад при  $k=1$ ) критическое отношение мощностей равно нулю. Это означает, что при таких длинах проблем с повышением напряжения на линиях нет.

Соотношение (10) позволяет получить зависимость необходимой степени компенсации зарядной мощности линии от волновой длины линии, если отсутствует возможность повышения напряжения в начале линии сверх номинального.

Принимая

$$E = k U_{\phi.n}; U_1 = U_{\phi.n}; \frac{P}{P_H} = 0,$$

получаем

$$\lambda_{кр} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta}} \arctg \frac{1-k}{\alpha\sqrt{1-\beta}}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что для исключения возможности повышения напряжения при малых нагрузках при  $k=1$  ( $E_n \geq U_{ф.н}$ ) при любой длине линии необходима 100 % компенсация зарядной мощности линии, а при  $k = 0,85$  ( $E_n \geq 0,85U_{ф.н}$ ) необходимая степень компенсации зарядной мощности линии быстро увеличивается при относительно малых длинах линии.

Проанализируем условия работы энергосистем при обычно принятой степени компенсации  $\beta = 0,6$  и длине линии порядка 350 км.

Полагая в формуле (10)  $E = kU_{ф.н}$ , получаем напряжение в начале линии

$$U_1 = U_{ф.н} \times \sqrt{k^2 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^2} \alpha \left[ \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} \operatorname{tg} \lambda \sqrt{1-\beta} + \alpha(1 - \operatorname{tg}^2 \lambda \sqrt{1-\beta}) \right] \quad (14)$$

$$\times \frac{1}{1 - \alpha \sqrt{1-\beta} \operatorname{tg} \lambda \sqrt{1-\beta}}$$

Результаты вычислений по этой формуле показывают, что при преобладающем влиянии турбогенераторов ( $\alpha = 2$ ) степень компенсации зарядной мощности линии  $\beta = 0,6$  явно недостаточна, особенно при наличии атомных станций.

Таким образом, степень компенсации зарядной мощности линий должна определяться с учетом типа электростанций.

#### ВПЛИВ СТУПЕНЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ТРИВАЛІ ПЕРЕНАПРУЖЕННЯ В МЕРЕЖІ

Э.Т. Красовська, П.Ф. Буданов

*Досліджується вплив ступеня компенсації зарядної потужності ліній електропередачі, хвильових параметрів лінії на величину перенапруження промислової частоти, на умови роботи генераторів і пристроїв обмеження перенапружень. В результаті аналізу хвильових рівнянь ліній електропередачі встановлена основна причина тривалих перенапружень промислової частоти, визначена залежність рівня напруги від величини передаваної потужності, ступеня компенсації зарядної потужності ліній, хвильових параметрів схеми. Застосування заходів обмеження тривалих перенапружень в режимах малого навантаження виключає можливість глибокого обмеження вимушеною складовою комутаційних перенапружень. Показано, що найбільш доцільним і економічним способом вирішення цієї проблеми є застосування керованих шунтуючих реакторів, що дозволяють забезпечити компенсацію надмірної реактивної потужності ліній в будь-якому режимі їх роботи.*

**Ключові слова:** електропередача, електростанція, хвильові параметри, ізоляція, перенапруження, пропускна спроможність, компенсація, реактор що шунтує.

#### INFLUENCE OF DEGREE OF INDEMNIFICATION REACTIVE POWER OF LINES OF ELECTRICITY TRANSMISSION ON THE PROTRACTED OVERSTRAINS IN NETWORK

E.T. Krasovskaya, P.F. Budanov

*Influencing of degree of indemnification charge power of lines of electricity transmission is explored, parameters of waves of line on the size of overstrain of industrial frequency, on the terms of work of generators and devices of limitation of overstrains. As a result of analysis of equalizations of waves of lines of electricity transmission principal reason of the protracted overstrains of industrial frequency is set, dependence of level of tensions is certain on the size of the passed power, degree of indemnification charge power of lines, parameters of waves of chart. Application of measures of limitation of the protracted overstrains in the modes of the small loading eliminates possibility of the deep limiting to the forced constituent of overstrains of commutations. It is shown that the most expedient and economical method of decision of this problem is application of the guided shunting reactors, allowing to provide indemnification surplus reactive power of lines in any their office hours.*

**Keywords:** electricity transmission, power-station, parameters of waves, isolation, overstrains, carrying capacity, indemnification, shunting a reactor.

#### Выводы

В результате анализа волновых уравнений линий электропередачи установлена основная причина длительных перенапряжений промышленной частоты, определена зависимость уровня напряжений от величины передаваемой мощности, степени компенсации зарядной мощности линий, волновых параметров схемы. Применяемые в настоящее время меры ограничения длительных перенапряжений в режимах малой нагрузки исключают возможность глубокого ограничения вынужденной составляющей коммутационных перенапряжений. В работе показано, что наиболее целесообразным и экономичным способом решения этой проблемы является применение управляемых шунтирующих реакторов, позволяющих обеспечить компенсацию избыточной реактивной мощности линий в любом режиме их работы.

#### Список литературы

1. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током / Г.Н. Александров. – М.: Знак, 1998. – 242 с.
2. Управляемые реакторы // Электротехника (спец.выпуск). – 1991. – №2. – С. 54-62.
3. Буданов П.Ф. Регулирование напряжения на длинных ЛЭП с помощью управляемых шунтирующих реакторов / П.Ф. Буданов, Э.Т. Красовская // Системы обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2008. – Вып. 3(70). – С. 97-101.

Поступила в редколлегию 4.06.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Ф. Артюх, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.