

УДК 621.311

П.Ф. Буданов, Э.Т. Красовская

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

*Рассматриваются возможности применения регулируемых шунтирующих реакторов в электрических системах. Исследованы зависимости напряжения в начале длинной линии от волновой длины линии и степени компенсации реактивной мощности ненагруженной линии. Показано влияние степени компенсации реактивной мощности на амплитуду вынужденной составляющей коммутационных перенапряжений. Регулирование зарядной мощности обеспечивает возможность более эффективного использования нелинейных ограничений, снижающих переходную составляющую внутренних перенапряжений. Применение управляемых шунтирующих реакторов позволяет повысить пропускную способность линий электропередачи.*

**Ключевые слова:** электрические системы; шунтирующий реактор, реактивная мощность, коммутационные перенапряжения.

### Введение

**Постановка проблемы.** Воздушные линии электропередачи являются протяженным токопроводом, создающим электрическое и магнитное поля. При этом электрическое поле линии мало изменяется при изменении условий работы линии в течении суток, а также года из-за ограниченных пределов изменения напряжения. Магнитное поле изменяется в широких пределах в соответствии с изменением тока в линии. Это обстоятельство определяет режимные особенности работы электропередач переменного тока и связанные с ними мероприятия по управлению работой электропередач.

Другая особенность заключается в том, что из-за большой протяженности линий фазы напряжения и тока изменяются вдоль линии. Фазовый сдвиг вдоль

линии определяется скоростью распространения электромагнитной волны, связанной с параметрами линии. Поэтому процесс передачи энергии по линии имеет волновую природу, что определяет необходимость анализа волновых процессов при исследовании режимов работы линий электропередачи.

Разность мощностей электрического и магнитного полей определяет реактивную мощность линии. Реактивная мощность линии равна нулю в частном случае равенства мощностей электрического и магнитного полей, а протекающий при этом ток называется натуральным (естественным) током линии. Соответствующий режим работы линии называется натуральным. Если ток в линии не совпадает с натуральным, то при токе, меньшем натурального, на линии имеется избыток реактивной мощности. Этот

избыток реактивной мощности должен быть поглощен энергосистемой. Напротив, при токе, большем натурального, линия потребляет реактивную мощность, при этом по отношению к источнику напряжения линия представляет собой как бы мощный реактор и нуждается в источнике реактивной мощности.

Таким образом, условия работы электропередач переменного тока определяют необходимость учета двух обстоятельств:

- во всех режимах работы линии необходимо обеспечить баланс реактивной мощности на электропередаче в целом;

- размещение компенсирующих устройств на линии должно обеспечить нормативные параметры различных режимов передачи.

При малых нагрузках в качестве потребителя избыточной реактивной мощности линии используются шунтирующие реакторы.

Постоянно включенные шунтирующие реакторы ограничивают пропускную способность линий, поэтому проектировщики стремятся ограничить степень компенсации зарядной мощности линий до 50...60%. Это в свою очередь при малых нагрузках приводит к повышению напряжения в электрических сетях сверх наибольшего рабочего. При этом пропускная способность линий снижается, не достигая естественного предела, определяемого натуральной мощностью линий.

Возможность изменения индуктивности реакторов обеспечит значительное улучшение условий эксплуатации электрических сетей.

**Анализ литературы.** Первые попытки создания реакторов с переменными параметрами были предприняты еще в 30-е годы. Для изменения индуктивности реактора использовалось перемещение стального сердечника реактора. Это позволяло изменять индуктивность реактора в широких пределах. Однако механическое перемещение сердечника занимает много времени.

В 1979 году фирмой ВВС создан управляемый реактор трансформаторного типа на 750 кВ, 450 Мвар пофазного исполнения. Каждая фаза реактора содержит замкнутый магнитопровод с зазорами в стержне и три обмотки: сетевую, постоянно подключенную к сети высокого напряжения, обмотку управления, замкнутую тиристорным блоком, и компенсационную обмотку, предназначенную для компенсации третьей гармоники в токе реактора. С этой целью компенсационные обмотки трех фаз соединены в треугольник.

Этот реактор установлен в системе Гидро-Квебек (Канада) и эксплуатируется до настоящего времени, но имеет ряд недостатков [1]. Разработки в этом направлении были прекращены.

Не получили широкого применения так называемые насыщающиеся реакторы, где изменение индуктивности реактора происходит из-за насыще-

ния стали сердечника и соответственно вытеснения магнитного потока из сердечника [2, 3].

Следующим этапом нового направления развития управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа (УШТР) было создание трехфазного реактора (Индия). Производство такого реактора было завершено в 2001 году, с тех пор реактор успешно эксплуатируется на промежуточной подстанции линии 400 кВ в Центральной Индии.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению возможностей и эффективности применения УШТР в электрических системах [4].

**Целью статьи** является исследование влияния степени компенсации зарядной мощности линии разной длины при установке УШТР на изменение напряжения вдоль линии во всем диапазоне регулирования выдаваемой мощности от холостого хода до номинальной нагрузки, анализ возможностей ограничения коммутационных перенапряжений в электрических сетях.

### Основной материал

Применение УШТР позволяет существенно улучшить всю систему регулирования напряжения в электрических сетях. Исследованы зависимости отношения модулей э.д.с. генераторов ( $E$ ) и напряжения ( $U$ ) в начале линии от длины линии. В режиме холостого хода э.д.с. может быть значительно меньше напряжения на зажимах генераторов. Режим работы генераторов с пониженной э.д.с. (с не до возбуждением) неблагоприятен. В связи с этим отношение ( $E/U$ ) ограничивается. Практически это обеспечивается тем, что при достижении ( $E/U$ ) предельного значения (0,85 или 1) регулятор генератора отключается и перестает поддерживать напряжение на зажимах генераторов ( $U$ ). При фиксированном токе возбуждения значение э.д.с. ( $E$ ) фиксировано, а напряжение на зажимах генератора увеличивается. Это напряжение трансформируется на высокую сторону. Такое повышение напряжения недопустимо в электрических сетях. Для его ограничения на линиях устанавливаются шунтирующие реакторы.

Применение управляемых шунтирующих реакторов, мощность которых регулируется в зависимости от режима работы электропередачи, исключает возможность снижения пропускной способности линии, освобождает генераторы от необходимости потребления реактивной мощности линий.

Стабилизация напряжения на зажимах генераторов обеспечивает стабилизацию напряжения на примыкающей к станции линии на уровне номинального напряжения, что определяет также возможность глубокого ограничения коммутационных перенапряжений на линиях.

Физические основы ограничения перенапряжений с помощью быстродействующих управляемых

реакторов могут быть пояснены на примере анализа переходного процесса включения линии, замещенной Т-образной схемой.

Напряжение на линии определяется [4] выражением (1):

$$U(t) = \frac{E_m}{1 + \frac{L_c + L_1}{L_p} - \omega^2(L_c + L_1)C_1} \times \left[ \cos \omega t - \cos \sqrt{\frac{L_c + L_1 + L_p}{L_p(L_c + L_1)C_1}} t \right], \quad (1)$$

где  $L_c$  – предвключенная индуктивность системы;  $L_1$  – рабочая индуктивность единицы длины линии;  $C_1$  – рабочая емкость единицы длины фазы линии;  $L_p$  – индуктивность реактора.

Как видно из формулы (1), на вынужденную составляющую напряжения промышленной частоты  $\omega$  накладывается переходная составляющая с угловой частотой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L_c + L_1 + L_p}{L_p(L_c + L_1)C_1}} \quad (2)$$

и с той же амплитудой, что и вынужденная составляющая.

Наибольшее напряжение на линии наблюдается при совпадении максимумов вынужденной и переходной составляющих.

Таким образом, уровень коммутационных перенапряжений на линиях определяется вынужденной составляющей перенапряжений.

Наибольшие амплитуды вынужденной составляющей перенапряжений соответствуют режиму холостого хода линии. В этом режиме распределение напряжения вдоль линии зависит от степени компенсации зарядной мощности линиями. При 100%ной компенсации зарядной мощности реакторами напряжение на холостом ходу всей линии одинаково. При недокомпенсации вынужденное напряжение в конце линии увеличивается при увеличении длины линии.

При использовании управляемых шунтирующих реакторов может быть достигнута 100% компенсация зарядной мощности линии и при этом не уменьшается пропускная способность линии. Действительно, быстрдействие УШТР позволяет увеличить ток реактора до номинального значения за полпериода напряжения промышленной частоты. Для обеспечения более глубокого ограничения перенапряжений ток УШТР в процессе коммутации может быть увеличен по сравнению с зарядным током линии.

При этом напряжение на свободном конце линии будет меньше, чем в месте подключения к источнику напряжения.

Расчет распределения напряжения при перекompенсации зарядной мощности произведен согласно цепочечной схеме замещения электропередачи (рис. 1). В этом случае эквивалентное индуктивное сопротивление реакторов определяется соотношением (3)

$$X_{p.э} = \frac{U_\phi}{I \cdot \lambda \left( \frac{Q_p}{P_n \cdot \lambda} - 1 \right)} = \frac{Z_B}{\lambda} \cdot \frac{1}{\frac{Q_p}{P_n \cdot \lambda} - 1}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – волновая длина участка линии;  $Z_B$  – его волновое сопротивление;  $Q_p$  – полная мощность реакторов на участке линии.

Конструкция УШТР, а именно наличие компенсационной обмотки, расположенной между обмоткой управления и сетевой обмоткой, позволяет кратковременно (на время коммутации линии) увеличить перекompенсацию линии до полутора-двукратной. В этом случае эквивалентное сопротивление реакторов согласно (3) составит

$$X_p = (1 \div 2) \frac{Z_B}{\lambda}. \quad (4)$$

При этом напряжение на свободном конце длинной линии в процессе коммутации с учетом переходной составляющей не превысит номинального напряжения.

Произведены расчеты напряжения в начале линии в зависимости от волновой длины линии и степени компенсации реактивной мощности линии. Результаты вычислений приведены на рис. 1.

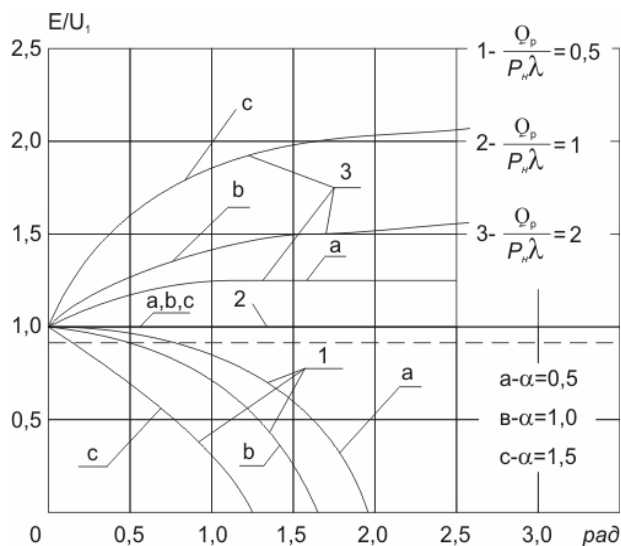


Рис. 1. Зависимости от волновой длины линий  $\lambda$  отношения  $E/U_1$  при  $P = 0$  и различной степени компенсации зарядной мощности линиями  $\beta = 0,5$  (кривые 1),  $\beta = 1$  (кривые 2) и  $\beta = 2$  (кривые 3) при различной величине индуктивного сопротивления источника напряжения:

$$\alpha = 0,5 \text{ (a); } \alpha = 1 \text{ (b); } \alpha = 1,5 \text{ (c), где } \alpha = \frac{X_s}{Z_B}.$$

Как видно, при 100%-ной компенсации зарядной мощности линии при любой длине линии и при любом индуктивном сопротивлении источника  $X_S$  напряжение в начале линии равно э.д.с. за переходным индуктивным сопротивлением источника и поддерживается регулятором генератора на уровне номинального напряжения. При перекомпенсации зарядной мощности линии  $(Q_p)P_n \lambda$  напряжение в начале линии меньше э.д.с., это определяет возможность его снижения по отношению к номинальному напряжению.

Ограничение вынужденной составляющей коммутационных перенапряжений до уровня номинального напряжения приводит к ограничению и переходной составляющей перенапряжений, а также обеспечивает возможность более эффективного использования нелинейных ограничителей для ограничения переходной составляющей перенапряжений.

При некоторых коммутациях линий, например, при АПВ максимальные перенапряжения могут превосходить двойную амплитуду вынужденной составляющей напряжения из-за увеличения переходной составляющей. Расчеты показывают, что за время, равное двум постоянным времени затухания колебательного процесса, напряжение уменьшается до  $0,135 U_{\phi}$  и практически не влияет на величину максимального значения перенапряжения. Поэтому оптимальное время паузы ОАПВ составляет  $\tau_{\text{ОАПВ}} \approx 1.2c$ . Но при трехфазном АПВ такая длительность паузы недопустима и максимальные перенапряжения могут быть значительно больше двойной амплитуды вынужденной составляющей. Это увеличение перенапряжений происходит за счет переходной составляющей, которая может быть ограничена нелинейными ограничителями перенапряжений.

Таким образом, применение управляемых реакторов позволяет обеспечить глубокое ограничение коммутационных перенапряжений в электрических сетях.

## Выводы

Расчеты показали эффективность применения управляемых шунтирующих реакторов для компенсации избыточной зарядной реактивной мощности линий электропередач высокого напряжения для глубокого ограничения внутренних перенапряжений, для регулирования напряжения вдоль всей линии электропередачи. Применение УШТР позволяет повысить пропускную способность линий электропередачи.

## Список литературы

1. Srinivasan K., Desrochers G.E., Desrochers C. *Static compensator loss estimation from digital measurements of voltages and current // IEEE Trans.on PAS-102. – 1983. – № 3. – P. 37-41.*
2. Соколов С.Е., Брянцев А.М. *Управляемый реактор с пространственным магнитопроводом // Известия вузов. Энергетика. – 1987. – № 10. – С. 101-108.*
3. *Управляемые ферромагнитные реакторы и их использование для управления режимами протяженных ЛЭП / С.Е. Соколов, Г.О. Борисов и др. – М.: ВО "Наука", 1993. – 262 с.*
4. Александров Г.Н. *Эффективность применения управляемых компенсаторов реактивной мощности на линиях электропередачи // Изв. Академии Наук. Энергетика. – 2003. – № 2. – С. 90-97.*

Поступила в редколлегию 14.04.2008

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

## РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НА ДОВГИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ КЕРОВАНИХ ШУНТУЮЧИХ РЕАКТОРІВ

Буданов П.Ф., Красовська Е.Т.

*Розглядаються можливості застосування регульованих шунтуючих реакторів в електричних системах. Досліджено залежності напруги на початку довгої лінії від хвильової довжини лінії і ступеня компенсації реактивної потужності ненавантаженої лінії. Показано вплив ступеня компенсації реактивної потужності на амплітуду вимушеної складової комутаційних перенапружень. Регулювання зарядної потужності забезпечує можливість ефективнішого використання нелінійних обмежень, що знижують перехідну складову внутрішніх перенапружень. Застосування керованих шунтуючих реакторів дозволяє підвищити пропускну спроможність ліній електропередачі.*

**Ключові слова:** електричні системи; шунтуючий реактор, реактивна потужність, комутаційні перенапруження.

## ADJUSTING OF TENSION ON LONG LINES OF ELECTRICITY TRANSMISSIONS BY THE GUIDED SHUNTING REACTORS

Budanov P., Krasovskaya E.

*Possibilities of application of the managed shunting reactors are examined in the electric systems. Dependences of tension are explored at the beginning of long line wave length of line and degree of indemnification reactive power of the unloaded line. Influence of degree of indemnification reactive power is shown on amplitude of the forced constituent of overstrains of commutations. Adjusting of charge power is provided by possibility of more effective use of nonlinear limitations, reducing the transitional constituent of internal overstrains. Application of the guided shunting reactors allows to promote the carrying capacity of lines of electricity transmission.*

**Keywords:** electric systems; shunting reactor, reactive power, overstrains of commutations.