

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Witt W., Loffler M. The electromagnetic Gun-CCloser to Weapon System Status // Military Technology. – 1998. – № 5. – P. 80–86.
2. Носов Г.В. К расчету параметров и эффективности преобразования энергии рельсотроном // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 70–73.
3. Носов Г.В. Расчет импульсных источников тока с индуктивными накопителями энергии // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 72–76.
4. Носов Г.В. Генерирование мощных импульсов тока электромашинными источниками с изменяющейся индуктивностью // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 68–70.
5. Асиновский Э.И., Лебедев Е.Ф., Леонтьев А.А. и др. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2002. – 398 с.
6. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. – Л.: Наука, 1985. – 224 с.
7. Импульсные системы большой мощности / под ред. Э.И. Асиновского. – М.: Мир, 1981. – 248 с.
8. Индуктивный генератор импульсов тока: пат. на ПМ 87847 Рос. Федерация. № 2009118719/22, заявл. 18.05.09: опубл. 20.10.09, Бюл. № 29. – 4 с.: ил.
9. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2000. – 592 с.
10. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
11. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.

Поступила 02.09.2010 г.

УДК 621.311.016.361

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДАЛЬНИХ ЛЭП С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

В.И. Готман, А.В. Глазачев

Томский политехнический университет
E-mail: mo@elti.tpu.ru

Рассматриваются закономерности регулирования напряжения и реактивной мощности дальних электропередач сверхвысокого напряжения с промежуточными системами по условию обеспечения минимальных потерь. Указан диапазон нагрузок, в пределах которых возможен режим согласованного регулирования напряжения, обеспечивающий максимальный КПД электропередачи. Исследуется влияние потерь при коронировании на зоны согласованного регулирования напряжения.

Ключевые слова:

Дальние электропередачи, промежуточные системы, согласованное регулирование напряжения, натуральная мощность, коронирование, компенсирующие устройства.

Key words:

Long-distance power line, intermediate system, coordinated voltage control, line natural load, corona effect, compensating units.

Введение

Несмотря на большое число глубоких и обширных работ по регулированию напряжения и реактивной мощности дальних линий электропередач (ДЛЭП) сверхвысокого напряжения, думается, что особенности, которые накладывают промежуточные системы (ПС), не позволяют считать эти вопросы исчерпанными. Не освещались ранее также вопросы, связанные с учетом коронирования проводов и его влияния на распределение напряжения и целесообразность применения глубокого регулирования напряжения в электропередачах сверхвысокого напряжения. Разработанное в последние годы новое поколение управляемых шунтирующих реакторов, статических тиристорных компенсаторов и конденсаторных батарей существенно расширяет возможности их применения для реализации согласованного регулирования напряжения

и реактивной мощности в указанных электропередачах.

В связи с чрезмерной нагрузкой высоковольтных ДЛЭП собственной реактивной мощностью и связанной с этим резкой неравномерностью распределения напряжения и тока целесообразно при помощи поперечных компенсирующих устройств (КУ) делить линию на участки. Компенсирующие устройства позволяют исключить переток реактивной мощности с одного участка на другой и проводить автономное регулирование реактивной мощности каждого участка.

Промежуточные системы в силу объективных условий в общем случае делят электропередачу на неравные участки с независимым характером изменения их активных мощностей. Эти особенности предопределяют более сложный закон регулирования напряжения и характер его распределе-

ния в электропередаче. Компенсирующие устройства целесообразно совмещать с узлом подключения промежуточных систем, что снижает общие затраты. Правильное в экономическом отношении регулирование напряжения электропередач с промежуточными системами возможно лишь при связанном регулировании напряжения всех участков схемы по условию минимума суммарных потерь.

Закономерности регулирования напряжения и реактивной мощности

Для исследования принята схема с одной промежуточной системой (рис. 1) с учетом того, что КУ установлены на передающем, приемном концах ДЛЭП и в узле подключения ПС. Участки электропередачи представлены обобщенными постоянными четырехполюсниками, компенсирующие устройства – поперечными проводимостями. В основе анализа оптимизационного режима лежит функционал суммарных потерь активной мощности в элементах схемы: двух участках ДЛЭП и трех КУ

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{1КУ} + \Delta P_{Л1} + \Delta P_{2КУ} + \Delta P_{Л2} + \Delta P_{3КУ}.$$

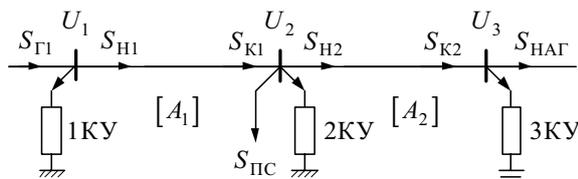


Рис. 1. Схема ДЛЭП с промежуточной системой

Потери мощности на первом участке определяются режимными параметрами его конца: $P_{К1}$ – активной, $Q_{К1}$ – реактивной мощностями и U_2 – напряжением на втором – параметрами начала $P_{Н2}$, $Q_{Н2}$, U_2 ; потери в КУ выражены через тангенс угла потерь ($\text{tg}\varphi_{КУ} = k_{П}$)

$$\Delta P_{КУ} = k_{П} Q_{КУ}.$$

Реактивная мощность компенсирующего устройства $Q_{КУ}$, определяется условиями баланса в узле его установки.

Минимизация функционала потерь по независимым режимным параметрам

$$\partial P_{\Sigma} / \partial Q_{К1} = 0, \quad \partial P_{\Sigma} / \partial Q_{Н2} = 0, \quad \partial P_{\Sigma} / \partial U_2 = 0$$

позволяет получить условия оптимального регулирования потоков реактивной мощности участков электропередачи $Q_{мК1}$, $Q_{мК2}$, мощности КУ и напряжения в узле подключения ПС:

$$U_{2\eta} = \sqrt{\frac{(P_{К1}g_2)^2 + (P_{Н2}g_1)^2}{2(g_1g_2)^2}}, \quad (1)$$

$$Q_{мК1} = -U_{2\eta}^2 b_{m1}, \quad Q_{мН2} = U_{2\eta}^2 b_{m2},$$

где

$$g_1 = \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2M_1} - 0,5 \left(b_{m1}^2 + \frac{M_2}{M_1} b_{m2}^2 \right)} \quad (2)$$

– эквивалентная активная проводимость первого участка электропередачи;

$$H_1 = \text{Re}(\dot{A}_1 \hat{C}_1) - k_{П} \text{Im}(\dot{A}_1 \hat{C}_1),$$

$$M_1 = \text{Re}(\dot{B}_1 \hat{D}_1) - k_{П} \text{Im}(\dot{B}_1 \hat{D}_1),$$

$$b_{m1} = \frac{\text{Im}(\dot{B}_1 \hat{C}_1) + k_{П} [\text{Re}(\dot{B}_1 \hat{C}_1) - A_1^2 + \gamma_1]}{2[\text{Re}(\dot{B}_1 \hat{D}_1) - k_{П} \text{Im}(\dot{B}_1 \hat{D}_1)]}$$

– эквивалентная реактивная проводимость; $\gamma_1 = 1 - \text{tg}\varphi_1$, φ_1 – фаза мощности со стороны источника питания узла 1.

Функционалы b_{m2} , g_2 получаются заменой в формулах b_{m1} и g_1 цифры 1 на 2.

В режимах до натуральной мощности емкостная генерация в электропередаче превосходит потери реактивной мощности в ней, что приводит к повышению напряжения в средней части участков. Вследствие этого реактивные мощности в конце участков линии носят индуктивный характер, в начале – емкостной. Для потребления избытка реактивной мощности в качестве КУ выступают шунтирующие реакторы. Представленные выше зависимости $U_{2\eta}$, $Q_{мК1}$, $Q_{мН2}$ соответствуют условию максимального КПД электропередачи $\eta_{\Sigma} = \max$ для произвольных значений $P_{К1}$ и $P_{Н2}$. При этих условиях закономерность регулирования мощности шунтирующего реактора в узле 2 определяется выражением:

$$Q_{2КУ} = -U_{2\eta}^2 (b_{m1} + b_{m2}).$$

Аналогичные по своей физической сущности соотношения получаются для отправного и приемного концов участков 1 и 2 схемы так, что мощности реакторов в этих узлах определяются выражениями:

$$Q_{1КУ} = P_{Н1} \text{tg}\varphi_1 - Q_{мН1}, \quad Q_{3КУ} = Q_{мК2} - P_{К2} \text{tg}\varphi_2.$$

Дополнительное снижение мощности и потерь в КУ можно добиться выбором закона регулирования реактивной мощности элементов схемы, связанных с узлами установки КУ: в узле 3 за счет полного или частичного потребления $Q_{мК2}$ приемной системой; в узле 2 за счет потребления части $Q_{2КУ}$ промежуточной системой; на передающем конце регулированием генераторами $\cos\varphi_1$. Для обеспечения максимального КПД (η_{Σ}) требуется согласованное регулирование напряжения, т. е. общий уровень напряжения электропередачи должен регулироваться в строгом соответствии со значениями активной мощности графика транзита (1).

В частности, при сбалансированной ПС по активной мощности $P_{К1} = P_{Н2}$ выражения (1), (2) упрощаются и принимают вид:

$$U_{2\eta} = \sqrt{P_{К1} / g_{\Sigma}}, \quad \text{где } g_{\Sigma} = \frac{\sqrt{2}g_1g_2}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} \quad (3)$$

и дополнительно при условии $[A_1] = [A_2]$

$$g_{\Sigma} = g_1 = g_2 = g_{\eta} = \sqrt{\frac{\text{Re}(\dot{D}\hat{C}) - k_{П} \text{Im}(\dot{D}\hat{C})}{\text{Re}(\dot{B}\hat{D}) - k_{П} \text{Im}(\dot{B}\hat{D})}} b_m^2.$$

Как следует из (3) при неравных длинах участков ЛЭП согласованное регулирование напряжения необходимо и для сбалансированной по активной мощности ПС, поскольку эквивалентная проводимость g_3 определяется параметрами обоих участков.

Распределение напряжения при согласованном регулировании

В режиме минимальных потерь соотношение напряжений по концам участков электропередачи можно характеризовать коэффициентами перепада напряжений:

$$k_{U_{12}} = U_{1\eta} / U_{2\eta}, \quad k_{U_{23}} = U_{2\eta} / U_{3\eta}.$$

Эти коэффициенты определяются постоянными четырехполюсников $[A_1], [A_2]$, коэффициентом потерь k_{Π} в КУ и зависят от соотношения активных мощностей участков $k_p = P_{H2} / P_{K1}$. При сбалансированной ПС ($k_p = 1$) оптимальные перепады на всем интервале согласованного регулирования напряжения являются величинами постоянными и положительными, т. е. $k_{U_{12}} > 1$ и $k_{U_{23}} > 1$. Для $P_{K1} \neq P_{H2}$, наряду с положительными перепадами при $k_p \leq 1$, возможны и отрицательные перепады напряжений. Это характерно для работы промежуточной системы в режиме выдачи активной мощности когда $k_p > 1$. Для заданных $[A_1], [A_2]$ и k_{Π} можно определить расчетные значения $k_{P(РАСЧ)}$, соответствующие равенству напряжений по концам участков. Числовые значения $k_{P(РАСЧ)}$ в функции длин участков для ЛЭП-500 кВ с маркой провода (ЗАСО-500) и ЛЭП-1000 кВ с маркой провода (4АСО-1000) при $\cos\varphi_1 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,92$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения $k_{P(РАСЧ)}$ в функции напряжения и длин участков электропередачи

$U_{НОМ}, \text{кВ}$	$k_{\Pi}, \text{отн. ед.}$	$l_{ЛЭП}, \text{км}$	$l_{ЛЭП}, \text{км}$	$N_{УЧ}$	$k_{P(РАСЧ)}$		
500	0,01	400	200	1	2,85		
			200	2	3,54		
		1500	750	1	1,44		
			750	2	1,48		
		1050	750	1	1,42		
			300	2	1,81		
		1050	300	1	2,71		
			750	2	3,05		
		1000	0,005	400	200	1	1,33
					200	2	1,47
1500	750			1	1,09		
	750			2	1,10		
1050	750			1	1,09		
	300			2	1,10		
1050	300			1	1,22		
	750			2	1,28		

По результатам расчетов можно отметить, что для любого сочетания длин участков $k_{P(РАСЧ)}$ второго участка больше $k_{P(РАСЧ)}$ первого участка; с повышением класса напряжения значения $k_{P(РАСЧ)}$ уменьшаются. Для электропередачи с несбалансированной ПС могут иметь место три характерных сочетаний оптимальных перепадов напряжения:

- 1) промежуточная система является дефицитной (в узле 2 осуществляется отбор мощности) и $k_p < k_{P(РАСЧ. \text{уч.1})}, k_{P(РАСЧ. \text{уч.2})}$ — при этих условиях на обоих участках положительный перепад, который возрастает с уменьшением k_p ;
- 2) $k_{P(РАСЧ. \text{уч.1})} < k_p < k_{P(РАСЧ. \text{уч.2})}$ — в этом случае на первом участке отрицательный перепад напряжения, на втором — положительный; большую вероятность такого сочетания имеют ДЛЭП с относительно короткими равными участками или неравными участками при $l_{\text{уч.1}} < l_{\text{уч.2}}$;
- 3) при $k_p > k_{P(РАСЧ. \text{уч.1})}, k_{P(РАСЧ. \text{уч.2})}$ на обоих участках отрицательный перепад напряжения, возрастающий по мере усиления неравенства.

Режимы промежуточных систем, обеспечивающих максимальный КПД электропередачи

Исходя из условия баланса мощности в узле подключения промежуточной системы $P_{ПС} = P_{K1} - P_{H2}$, её режим по активной мощности можно характеризовать параметром $k_p = P_{H2} / P_{K1}$. Выше выявлены условия, обеспечивающие минимальные потери в схеме считая, что P_{K1} и P_{H2} для любого момента являются величинами произвольными и независимыми. Оптимальное соотношение k_p , обеспечивающее максимальный КПД $\eta_{\Sigma\text{max}}$ электропередачи можно определить из условия $d\eta_{\Sigma} / dk_p = 0$, которое дает

$$k_{P\eta} = g_{2\eta} / g_{1\eta}, \tag{4}$$

где $g_{1\eta} = \sqrt{\frac{H_1}{M_1} - b_{m1}^2}$ и заменой индекса 1 на 2 получаем $g_{2\eta}$.

Выражение (4) указывает на то, что для достижения $\eta_{\Sigma\text{max}}$ режим промежуточной системы должен носить вынужденный характер и определяется соотношением длин примыкающих участков. Для $k_{P\eta} = P_{H2} / P_{K1} = g_{2\eta} / g_{1\eta}$ условия связанного регулирования напряжения электропередачи по минимуму суммарных потерь совпадают с условиями автономного оптимального регулирования для каждого участка в отдельности; напряжения узлов электропередачи определяются выражениями:

$$U_{1\eta} = \sqrt{P_{H1} / g_{1\eta}}, \quad U_{2\eta} = \sqrt{P_{K1} / g_{1\eta}} = \sqrt{P_{H2} / g_{2\eta}},$$

$$U_{3\eta} = \sqrt{P_{K2} / g_{2\eta}}.$$

В противном случае условия минимума потерь всей электропередачи и каждого участка в отдельности не идентичны. Для ДЛЭП с несколькими промежуточными системами условия $\eta_{\Sigma\text{max}}$ имеют место при соблюдении для любых смежных участков соотношений:

$$\frac{P_{K1}}{P_{H2}} = \frac{g_{1\eta}}{g_{2\eta}} \dots \frac{P_{K(n-1)}}{P_{Hn}} = \frac{g_{(n-1)\eta}}{g_{\eta}} = idem.$$

При этих условиях имеет место режим согласованных нагрузок, характерными особенностями которого являются: линейная зависимость реактивных мощностей на концах участков от соответ-

ствующих значений активных мощностей; потери активной мощности и активная мощность участка имеют линейную связь; $\eta_{\Sigma \max}$ определяется только обобщенными постоянными участка и коэффициентом потерь в КУ и не зависит от передаваемой мощности. Это позволяет полосу нагрузок, соответствующую регулировочному диапазону трансформаторов, передавать с неизменным максимальным КПД.

Оптимальные режимы электропередач при учете потерь на корону

При неизменности обобщенных постоянных участков электропередачи A, B, C, D и коэффициента k_{Π} значения b_{mi}, g_i остаются неизменными по величине и знаку на всем интервале согласованного регулирования напряжения. Расчеты показывают, что при отсутствии коронирования проводов оптимальным режимам электропередач 500, 750, 1000 кВ с длинами участков 200...1000 км при $k_{\Pi}=0,005...0,010$ соответствует индуктивный характер реактивной мощности в конце участков и емкостный – в начале. В качестве компенсирующих устройств выступают реакторы, что соответствует отрицательным значениям b_{mi} , при этом предельные значения активных мощностей участков по условиям ограничения напряжения на уровне $U_{\text{НОМ}}$ не превосходят натуральной мощности некомпенсированной ЛЭП.

Несколько иная картина имеет место при коронировании проводов. Потери мощности на коронирование можно приближенно учесть погонной активной проводимостью $g_{\text{ок}}$, равномерно распределенной вдоль линии (участка линии) и зависящей как от погодных условий, марки и конструктивного исполнения фазных проводов ЛЭП, так и расчетного уровня напряжения [6]. Зависимость $g_{\text{ок}}$ в функции напряжения не линейна и близка к квадратичной. Для наиболее тяжелых погодных условий «дождь» – «изморось» для ЛЭП-500 кВ с маркой провода (ЗАСО-500) при изменении напряжения в диапазоне 400...525 кВ погонная проводимость изменяется в интервале $g_{\text{ок}}=(0,11...0,22) \cdot 10^{-6}$ См/км; для ЛЭП-1000 кВ с маркой провода (ЗАСО-1000) при изменении $U=850...1050$ кВ проводимости $g_{\text{ок}}=(0,11...0,32) \cdot 10^{-6}$ См/км. При указанных условиях параметры четырехполюсников A, B, C, D зависят от проводимости короны и, следовательно, являются функцией распределения напряжения на участках электропередачи; в равной мере это относится и к эквивалентным проводимостям b_{mi} и $g_i (g_{\eta})$.

В пределах одного класса напряжения по мере увеличения U от нижнего возможного уровня до верхнего эквивалентная реактивная проводимость b_{mi} уменьшается по абсолютному значению за счет возрастания потерь на корону и, проходя нулевое значение, меняет знак с отрицательного на положительный; при последующем возрастании напряжения проводимость b_{mi} увеличивается (рис. 2). Таким образом, при согласованном регулировании напряжения, начиная с некоторого зна-

чения передаваемой мощности, оптимальному режиму соответствует емкостный характер реактивной мощности в конце участков и индуктивный – в начале. При этих условиях КУ носят емкостный характер. Активные проводимости g_i в отличие от реактивных всегда являются величинами положительными и по мере возрастания уровня напряжения увеличиваются.

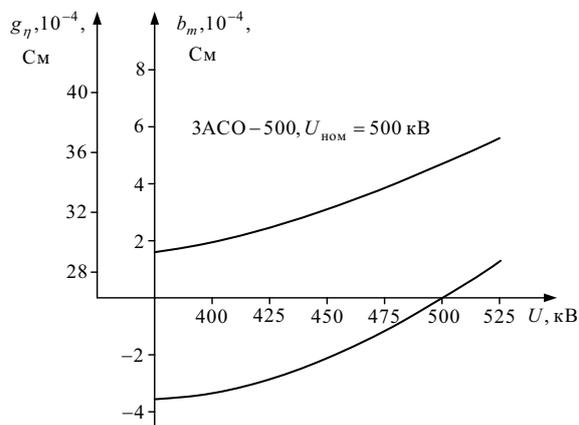


Рис. 2. Зависимости $b_{mi}, g_{\eta}=f(U)$ ЛЭП-500 кВ при $l=500$ км

Для участка электропередачи ЛЭП-500 длиной 500 км (погодные условия «дождь» – «изморось») эквивалентная проводимость b_{mi} проходит через ноль при $U=500$ кВ (рис. 2); для ЛЭП-750 кВ – при $U=720$ кВ; для ЛЭП-1000 кВ – при $U=850$ кВ. Эти результаты свидетельствуют о том, что для ЛЭП-500; 750 кВ даже при наличии коронирования верхняя граница оптимальной мощности равна или незначительно превышает натуральную мощность; для ЛЭП-1000 кВ область нагрузок, в которой возможен режим максимального КПД, превышает натуральную мощность. Увеличение потерь на корону $g_{\text{ок}}$ приводит к возрастанию проводимостей b_{mi} и $g_i (g_{\eta})$ и увеличению области режима больше натуральной мощности. Для сравнения отметим, что для участка $l=500$ км электропередачи 500 кВ при отсутствии коронирования $b_{mi}=-8,3 \cdot 10^{-4}$ См, $g_{\eta}=16,2 \cdot 10^{-4}$ См; при наличии потерь на корону эти проводимости для уровня напряжения $U=500$ кВ составляют: $b_{mi}=0, g_{\eta}=35,5 \cdot 10^{-4}$.

Зоны оптимального регулирования режимных параметров

Как отмечалось выше, для обеспечения максимального КПД требуется согласованное с активной мощностью участков электропередачи регулирование напряжения в узловых точках схемы. Современные мощные трансформаторы имеют диапазон регулирования $\pm(10...12) \% U_{\text{НОМ}}$. Применительно к высоковольтным электропередачам 500...1000 кВ, в которых верхний предел по условиям изоляции ограничен на уровне $1,05 U_{\text{НОМ}}$, более целесообразно иметь трансформаторы с асимметричным диапазоном регулирования: $(+5...-20) \% U_{\text{НОМ}}$. Благодаря этому имеются реальные возможности в некотором диапазоне изменения активной мощности

транзита вести режим минимальных потерь или близкий к нему режим.

Были проведены исследования режимов максимального КПД ДЛЭП-500, 750, 1000 кВ при вариации исходных условий. Для примера на рис. 3 приведены зоны возможных оптимизационных режимов ЛЭП-500 кВ в функции длины участков при условиях: промежуточная система сбалансирована, длины участков и их коэффициенты четырехполюсников одинаковы $[A_1]=[A_2]$, диапазон регулирования напряжения на всех подстанциях составляет $(0,8...1,05)U_{НОМ}$, потери на корону отсутствуют, $k_{П}=0,01$. При указанных условиях имеют место положительные перепады напряжений на обоих участках ЛЭП ($k_{U12}>1, k_{U23}>1$).

Интервал мощностей между границами 2, 3 соответствует в полной мере условиям режима минимальных потерь. Граница 2 определяет нагрузки ДЛЭП, при которых напряжение узла 1 достигает $U_1=1,05U_{НОМ}$; при последующем возрастании мощности верхнего предельного значения достигается напряжение $U_2=1,05U_{НОМ}$ и в последнюю очередь $U_3=1,05U_{НОМ}$, что соответствует границе 1.

Таким образом, для нагрузок зоны 1–2 осуществляется последовательное ограничение напряжения узлов 2, 3, в результате возможна частичная реализация оптимизационных режимов. Граница 3 определяет мощности, при которых напряжение узла 3 достигает возможного нижнего предела $U_3=0,8U_{НОМ}$, при этом $U_1, U_2>0,8U_{НОМ}$. При последующем снижении мощности на предельном нижнем уровне фиксируется напряжение $U_2=0,8U_{НОМ}$ и в последующем $U_1=0,8U_{НОМ}$, что определяет границу 4. Зона 3–4 определяет режимы с минимально возможными отклонениями от оптимального.

По результатам проведенных исследований ДЛЭП – 500, 750, 1000 кВ можно отметить, что:

- диапазон нагрузок, при которых возможен оптимальный или частично оптимальный режим, сужается по мере увеличения длин участков ЛЭП;
- с возрастанием класса напряжения зона максимального КПД расширяется и сдвигается в область больших нагрузок; напротив, зоны частично оптимального режима сужаются, в особенности, при учете коронирования;
- наличие коронирования приводит к увеличению зоны согласованного регулирования в среднем более чем в два раза и одновременно сдвигает ее в область больших нагрузок.

Интервалы мощностей, при которых возможны оптимальные режимы ДЛЭП с одной промежуточной системой при согласованном регулировании напряжения в пределах $(0,8...1,05)U_{НОМ}$, составляют для:

- ЛЭП-500 кВ
- $(0,1...0,3)...(0,97...0,66) P_{НАТ}$ без короны;
- $(0,3...0,46)...(1,4...1,2) P_{НАТ}$ при наличии короны;
- ЛЭП-750 кВ
- $(0,13...0,3)...(0,73...0,6) P_{НАТ}$ без короны;
- $(0,33...0,47)...(1,4...1,2) P_{НАТ}$ при наличии короны.

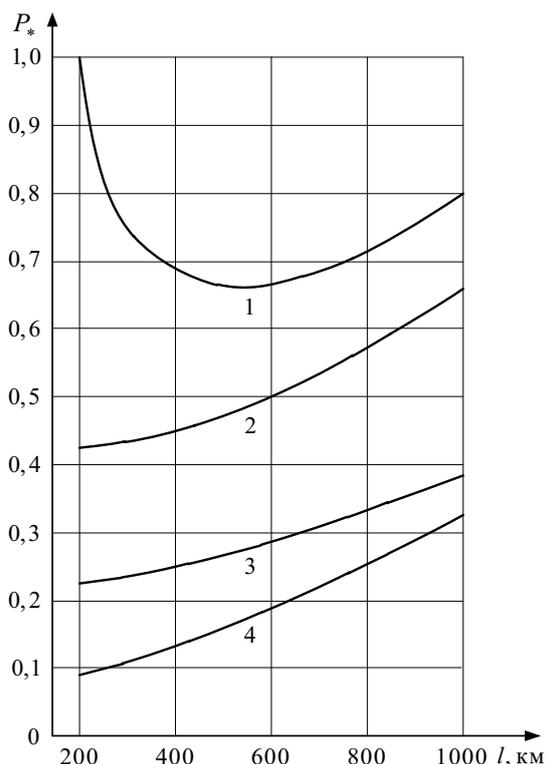


Рис. 3. Зоны оптимального перехода ЛЭП-500 кВ без коронирования

Большее число в круглых скобках соответствует участкам ДЛЭП 200 км, меньшее – 1000 км.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты снижения потерь мощности при согласованном регулировании напряжения. Расчеты проведены для ДЛЭП с одной сбалансированной промежуточной системой; длины участков приняты равными; передаваемая мощность выражена в относительных единицах на базе натуральной, которая составляет:

- ЛЭП-500 кВ (ЗАСО-500) $P_{НАТ}=900$ МВт;
- ЛЭП-750 кВ (4АСО-700) $P_{НАТ}=2400$ МВт;
- ЛЭП-1000 кВ (4АСО-1000) $P_{НАТ}=3920$ МВт.

Таблица 2. Показатели снижения потерь для условий согласованного регулирования напряжения: δP – снижение потерь при согласованном регулировании напряжения в диапазоне $(0,8...1,05)U_{НОМ}$ по сравнению с режимом $U_1=U_2=U_3=U_{НОМ}=const$, %

P_*	$U, \text{кВ}$							
	500		750		100		1000*	
	I	II	I	II	I	II	II	II
	$\delta P, \%$							
0,4	37,0	43,0	59,8	64,8	85,0	83,5	21,5	18,7
0,5	31,3	34,5	53,5	54,5	78,4	77,5	13,1	10,5
0,6	25,2	25,4	47,0	51,0	70,7	71,0	6,2	5,6
0,7	17,9	17,1	39,0	43,3	62,0	63,0	3,2	2,2
0,8	10,7	10,4	31,0	35,0	54,0	54,0	1,7	0,8
0,9	6,2	4,8	22,0	25,6	46,7	44,4	–	–
1,0	3,1	2,5	15,2	17,4	40,5	34,2	–	–
1,1	2,0	0,8	8,4	9,8	35,1	25,4	–	–
1,2	1,2	0,0	3,5	3,5	24,6	18,4	–	–

Примечания: I соответствует длине участка 300; II – 500 км; *без коронирования

Эффективность режима максимального КПД оценивается показателем

$$\delta P = \frac{\Delta P_{0\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{0\Sigma}} 100 \%,$$

где $\Delta P_{0\Sigma}$ – потери мощности в электропередаче для режима $U_1=U_2=U_3=U_{\text{НОМ}}=\text{const}$; $\Delta P_{1\Sigma}$ – потери для режима согласованного регулирования напряжения в узлах 1–3 в диапазоне $(0,8...1,05)U_{\text{НОМ}}$.

Выводы

1. В дальних электропередачах напряжением 500, 750, 1000 кВ согласованное регулирование напряжения при отсутствии коронирования позволяет снизить уровень потерь до 35 % и при коронировании – до 50 %.
2. При отсутствии коронирования значения активных мощностей, для которых возможны ре-

жимы минимальных потерь, находятся в пределах натуральной мощности. С повышением класса напряжения электропередачи и увеличением потерь на корону зоны оптимального регулирования сдвигаются в область больших мощностей; верхней границе зоны минимальных потерь могут соответствовать мощности нагрузок, превышающие в 1,5 раза натуральную мощность.

3. Для обеспечения согласованного регулирования напряжения диапазон регулирования напряжения трансформаторов должен обосновываться экономически соответственно конкретным условиям. Наличие промежуточных систем на дальних электропередачах благоприятствует практической реализации режимов согласованного регулирования напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов К.М., Окин А.А., Портной М.Г. и др. Основные направления нормализации уровней напряжения в основных электрических сетях Единой энергосистемы России // Электрические станции. – 1995. – № 9. – С. 15–18.
2. Кочкин В.И. Управляемые шунтирующие реакторы для высоковольтных линий электропередачи // Энергетик. – 1999. – № 5. – С. 27–31.
3. Вишняков Н.Г., Киракосов В.Г., Кочкин В.И. и др. Статический тиристорный компенсатор на подстанции 220 кВ «Могоча» АО Читаэнерго // Вестник ВНИИЭ. – 1996. – № 3. – С. 8–12.

4. Маслов А.А., Нечаев О.П., Федотов А.И. Высоковольтные тиристорные вентили для статических компенсаторов реактивной мощности // Вестник ВНИИЭ. – 1997. – № 6. – С. 15–18.
5. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 248 с.
6. Александров Г.Н. Коронный разряд на линиях электропередачи. – М.: Энергия, 1964. – 240 с.

Поступила 01.07.2010 г.

УДК 621.316.13;621.314

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ

А.Ю. Иванов, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.В. Русанов, А.В. Федотов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: msg@ie.tusur.ru

Обсуждаются вопросы разработки новых технологий компенсации не только реактивной мощности в распределительных сетях электрической энергии, но и мощности искажений, эмитируемой в сеть нелинейными нагрузками. Основное внимание концентрируется на вопросах решения задачи компенсации современными средствами силовой электроники и моделирования электромагнитных процессов.

Ключевые слова:

Распределительные сети, реактивная мощность, мощность искажений, компенсация, полупроводниковый преобразователь.

Key words:

Distributive networks, reactive power, distortion power, compensation, semiconductor converter.

Введение

В литературе по энергетическим системам широко представлены материалы по создаваемым и уже реализованным технологиям компенсации реактивной мощности [1–3]. Под технологией

компенсации реактивной мощности понимается процесс управления реактивной энергией для повышения качества электроэнергетики, поскольку большинство таких проблем можно решить, контролируя реактивную мощность в текущем време-