

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ И ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ И ИРМ

Пацюк В.И.

Институт энергетики АН Молдовы

patsiuk@usm.md

Аннотация. Приведены замкнутые формулы для определения установившихся значений напряжений, токов, активной и реактивной мощности в линии с распределенными и сосредоточенными параметрами. Исследуется влияние шунтирующих реакторов и ИРМ в виде конденсаторных батарей на потери ХХ с различной волновой длиной. Для полуволновой линии найдены оптимальные параметры шунтирующих реакторов, которые позволяют повысить КПД при передаче при передаче натуральной мощности.

Ключевые слова: телеграфные уравнения, полуволновая и четвертьволновая линия, потери активной мощности, шунтирующие реакторы и источники реактивной мощности (ИРМ).

DIMINUAREA PIERDERILOR ÎN LINIILE DE TRANSPORT ALE ENERGIEI ELECTRICE DE CURENT ALTERNATIV LA MERS ÎN GOL ÎN PROCESUL DE TRANSMITERE A PUTERII NATURALE CU AJUTORUL REACTORILOR SHUNT ȘI A SURSELOR DE PUTERE REACTIVĂ

Pațuc V.I.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat. Sunt prezentate formule analitice închise pentru determinarea valorilor tensiunilor staționare, a intensităților și a puterii active și reactive într-un circuit de transmisie cu constante distribuite și concentrate. Se studiază influența reactorilor shunt și a surselor de putere reactivă de forma bateriilor condensatoare asupra pierderilor mers în gol cu lungimi de undă distincte. Pentru circuite cu lungimea de semiundă sunt determinați parametrii reactorilor shunt ce permit să se ridice randamentul în procesul de transmitere a puterii naturale.

Cuvinte-cheie: Ecuațiile telegrafulor, linie (circuite) cu lungimea de o doime și o pătrime de undă, pierderile puterii active, reactori shunt și surse de putere reactivă.

IDLING AND NATURAL POWER TRANSFER LOSS SAVING IN TRANSMISSION FACILITIES OF ALTERNATING CURRENT BY MEANS OF SHUNT REACTORS AND REACTIVE POWER SOURCES

Patsiuk V.I.

Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The closed formulas for definition of the steady-state values of voltages, currents, active and reactive power in a line with the distributed and lumped constants are shown. The influence of the shunt reactors and reactive power sources in the form of capacitor banks on losses of idling with various wave lengths is investigated. For the half-wave transmissions line the optimal parameters (which allow increasing of the output during the natural-power transfer) of the shunt reactors were obtained.

Key words: the telegraph equations, half-wave and quarter-wave transmission line, watt loss, shunt reactors and reactive power sources

Введение

У энергетиков с давних времен существует самый настоящий культ борьбы с потерями, на это брошены мощные силы ученых, конструкторов, технологов. Победой считается снижение потерь даже на малые доли процента. Главными факторами, определяющими потери мощности при ее транспортировке переменным или постоянным током, являются активное продольное сопротивление $R(x,t)$ и поперечная проводимость изоляции $G(x,t)$. Однако в сильноточных электрических цепях помимо диссипации волн имеет место и их дисперсия. Именно это обстоятельство и можно использовать для перераспределения составляющих квазиустановившихся электромагнитных процессов: уменьшение мощности магнитного поля в пользу увеличения мощности электрического поля, вследствие чего удастся достичь уменьшения потерь ХХ и при передаче натуральной мощности.

1. Установившийся режим однородной линии с сосредоточенными LC – цепочками

Рассмотрим включение в линию компенсирующих устройств (КУ) в виде шунтирующих реакторов и конденсаторных батарей (рис. 1.1). Поскольку рассматривается установившийся режим в электрической цепи синусоидального напряжения, то для решения телеграфных уравнений воспользуемся символическим методом [1].

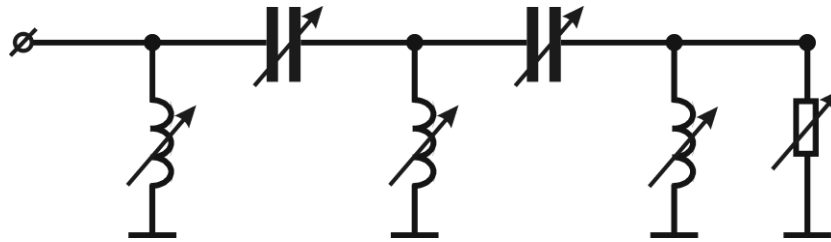


Рис. 1.1. Включение в линию шунтирующих реакторов и ИРМ.

Обозначим комплексные амплитуды напряжений и токов на входе-выходе электрической цепи U_0, I_0, U_N, I_N , а в точках включения сосредоточенных элементов:

$$U_k(x_k - 0) = U_k^{(1)}, U_k(x_k + 0) = U_k^{(2)}, I_k(x_k - 0) = I_k^{(1)}, I_k(x_k + 0) = I_k^{(2)}, k = \overline{1, N-1},$$

$$x_k = \sum_{i=1}^k l_i, x_1 = l_1, x_2 = l_1 + l_2, \dots, x_N = l.$$

В случае однородной линии с параметрами L, C, R, G без включенных сосредоточенных элементов решение задачи на отрезке $x \in [0, l]$ имеет вид

$$U_0 = Z_{BX} I_0, U_N = Z_S I_N, Z_S = R_S, \quad (1.1)$$

$$I_N = -\frac{U_0}{Z_0} \operatorname{sh}(\gamma l) + I_0 \operatorname{ch}(\gamma l) = \frac{I_0}{Z_0} \left[Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l) - Z_{BX} \operatorname{sh}(\gamma l) \right] =$$

$$= \frac{I_0 Z_0}{Z_S \operatorname{sh}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l)} = \frac{U_0}{Z_S \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l)}, \quad (1.2)$$

$$Z_{BX} = Z_0 \frac{Z_S \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l)}{Z_S \operatorname{sh}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l)}, \quad (1.3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \quad (1.4)$$

Здесь Z_{BX}, Z_0 – входное и волновое сопротивление линии, γ – постоянная распространения, Z_S – сопротивление нагрузки, $\omega = 2\pi f$, f – частота питающего генератора.

Решение для линии с $(N-1)$ включенными сосредоточенными элементами получим следующим образом. Обозначим сопротивления последовательно включенных ИРМ через $Z_{n1}^{(k)}$, а сопротивления параллельно включенных шунтирующих реакторов через $Z_{n2}^{(k)}$. Тогда условия сопряжения в точках x_k для ИРМ имеют вид

$$U_k^{(1)} - U_k^{(2)} = Z_{n1}^{(k)} I_k^{(1)}, \quad I_k^{(1)} = I_k^{(2)}, \quad Z_{n2}^{(k)} = \infty, \quad k = 1, \dots, N-1 \quad (1.5)$$

и для шунтирующих реакторов

$$U_k^{(1)} = U_k^{(2)}, \quad U_k^{(2)} = Z_{n2}^{(k)} (I_k^{(1)} - I_k^{(2)}), \quad Z_{n1}^{(k)} = 0, \quad k = 1, \dots, N-1. \quad (1.6)$$

Для решения задачи с условиями сопряжения (1.5) и (1.6) введем понятия входного сопротивления $Z_{BX}^{(k)}$ для частей линии $x \in [x_k, l]$, $k = \overline{1, N-1}$. Тогда комплексы напряжений и токов в точках $x = x_k + 0$ будут связаны соотношениями

$$U_k^{(2)} = Z_{BX}^{(k)} I_k^{(2)}, \quad (1.7)$$

$$Z_{BX}^{(k)} = Z_0 \frac{Z_n^{(k+1)} \operatorname{ch}(\gamma l_{k+1}) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l_{k+1})}{Z_n^{(k+1)} \operatorname{sh}(\gamma l_{k+1}) + Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_{k+1})}, \quad k = \overline{0, N-1}; \quad Z_n^{(N)} = Z_s. \quad (1.8)$$

В точках $x = x_k - 0$ из (1.5) и (1.6) будем иметь

$$U_k^{(1)} = Z_n^{(k)} I_k^{(1)}, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad (1.9)$$

где $Z_n^{(k)} = Z_{n1}^{(k)} + Z_{BX}^{(k)}$ для ИРМ и $Z_n^{(k)} = \frac{Z_{n2}^{(k)} Z_{BX}^{(k)}}{Z_{n2}^{(k)} + Z_{BX}^{(k)}}$ для шунтирующих реакторов.

Значения токов и напряжений слева и справа от точек x_k и на концах линии связаны рекуррентными соотношениями

$$I_1^{(1)} = \frac{I_0 Z_0}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_1) + Z_n^{(1)} \operatorname{sh}(\gamma l_1)}, \quad I_0 = U_0 / Z_{BX}^{(0)}, \quad U_1^{(1)} = Z_n^{(1)} I_1^{(1)}, \quad (1.10)$$

$$U_k^{(2)} = \left(1 - \frac{Z_{n1}^{(k)}}{Z_n^{(k)}}\right) U_k^{(1)}, \quad I_k^{(1)} = \left(1 + \frac{Z_{BX}^{(k)}}{Z_{n2}^{(k)}}\right) I_k^{(2)}, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad (1.11)$$

$$I_k^{(1)} = \frac{I_{k-1}^{(2)} Z_0}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_k) + Z_n^{(k)} \operatorname{sh}(\gamma l_k)}, \quad U_k^{(1)} = Z_n^{(k)} I_k^{(1)}, \quad k = \overline{2, N-1}, \quad (1.12)$$

$$I_N = \frac{I_{N-1}^{(2)} Z_0}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_N) + Z_s \operatorname{sh}(\gamma l_N)}, \quad U_N = Z_s I_N. \quad (1.13)$$

Объединяя формулы (1.10)-(1.13), получим выражение тока на выходе линии через начальное напряжение

$$I_N = \frac{I_0 Z_0^N}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_N) + Z_s \operatorname{sh}(\gamma l_N) \prod_{k=1}^{N-1} \left[\left(1 + \frac{Z_{BX}^{(k)}}{Z_{n2}^{(k)}} \right) \left(Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_k) + Z_n^{(k)} \operatorname{sh}(\gamma l_k) \right) \right]}, \quad (1.14)$$

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_{BX}^{(0)}}, \quad Z_{BX}^{(0)} = Z_0 \frac{Z_n^{(1)} \operatorname{ch}(\gamma l_1) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l_1)}{Z_n^{(1)} \operatorname{sh}(\gamma l_1) + Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l_1)}. \quad (1.15)$$

Мощности генератора и нагрузки вычисляются по формулам

$$P_0 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(U_0^* I_0 \right) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(U_0 I_0^* \right) = \frac{U_0^2}{2} \operatorname{Re} \left(\frac{1}{Z_{BX}^{(0)}} \right),$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(U_N^* I_N \right) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(U_N I_N^* \right) = \frac{|I_N|^2 \operatorname{Re}(Z_s)}{2} = \frac{R_s |I_N|^2}{2}. \quad (1.16)$$

Полученные соотношения (1.6)–(1.16) позволяют провести параметрический анализ влияния включения сосредоточенных элементов на распределение напряжений и токов, а также потерь мощности вдоль всей линии

$$\Pi = \frac{P_0 - P_1}{P_H}, \quad P_H = \frac{U_0^2}{2Z_B}.$$

2. Результаты численных экспериментов по минимизации потерь

Рассмотрим однородную без дополнительных присоединений линию с безразмерными параметрами: $C = L = 2P_H = 1$; $R = 0.48$; $G = R/7$ и замкнутую на нагрузку с комплексным сопротивлением Z_s . Построим вначале функциональные зависимости активной и реактивной мощности источника (генератора) от длины разомкнутой линии без потерь $R = G = 0$ (а) и с потерями $R = 7G = 0.48$ (b). Из графиков, представленных на рис. 2.1 видно, что в окрестности четвертьволновой линии активные потери при отключенной нагрузке ($Z_s = \infty$) достигают максимальных значений, тогда как для полуволновой линии они относительно невелики и составляют 13.58%, если соотносить их с натуральной мощностью $P_H = 0.5$. При работе линии на согласованную нагрузку: $Z_s = Z_0 = 1.0009 - j0.0327$ потери активной мощности равны 24.75%, а когда нагрузка чисто активная: $Z_s = Z_B = 1$ эти потери несколько меньше и составляют 24.65%. Однако, исходя из того, что потери на холостом ходу должны быть как минимум в два раза меньше, чем при передаче натуральной мощности [2-4], поставим задачу их минимизации с помощью включения в линию компенсирующих устройств в виде ШР или ИРМ.

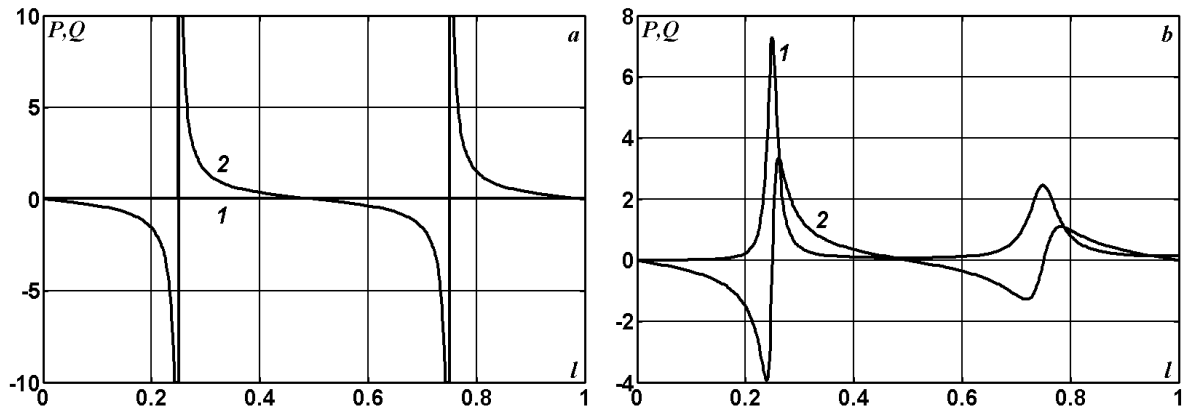


Рис. 2.1. Зависимость активной и реактивной мощности генератора (кривые 1;2) от длины разомкнутой линии при $R = G = 0$ (a); $R = 7G = 0.48$ (b).

Параллельное подключение к полуволновой линии идеальных ШР позволяет снизить потери ХХ до 2.28%, если индуктивности L_n и их месторасположение выбрать так, как это приведено в таблице 2.1, тогда как последовательное включение в линию конденсаторных батарей с емкостями C_n не дает ощутимого результата. Для линий с волновой длиной $1/4$ и $1/8$ включение всего двух реакторов приводит к снижению потерь до 1.97% и 0.89% соответственно. Напомним, что безразмерному значению $L_n = 1$ соответствует $L_n = 5.56$ Гн, для которого мощность реактора $Q_n = \frac{U_0^2}{2\omega L_n} = 330.5$ МВАр

при фазном напряжении $U_0 = 525\sqrt{2/3} = 428.66$ кВ.

Все эти результаты убедительно указывают на очевидные преимущества ШР по сравнению с ИРМ в свете решения задачи уменьшения потерь ХХ и подтверждают выводы, изложенные в работах Г. Н. Александрова [1-3].

В ряде работ [5-7] тем не менее указывается и на ряд нежелательных последствий эксплуатации ВЛ 500...1150 кВ, оснащенных ШР, при нештатных (несимметричных, неполнофазных) режимах. Использование ШР заметно усложняет процессы при коммутациях воздушных линий и способно приводить к резонансным явлениям, обусловленным наличием емкости у линии и индуктивности у реактора. Отсюда появляется потребность в расчете переходных процессов, вызванных кратковременным неполнофазным включением (отключением) ВЛ ВН, чему мы намерены уделить самое пристальное внимание используя точную постановку начально-краевой задачи для телеграфных уравнений. Следует также провести тщательные сравнительные исследования эффективности и управляемости ШР различного конструктивного исполнения: управляемых с помощью подмагничивания магнитопроводов ШР (УШР) и компенсатора трансформаторного типа (УШКТ). Такие исследования позволили бы определить преимущественные ниши использования этих реакторов в воздушных электропередачах высокого напряжения различного назначения и конструктивного исполнения [5-7].

Для большей наглядности представим некоторые из полученных результатов по определению оптимальной мощности и месторасположения ШР в графическом виде. На рис. 2.2. показано распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3;4) мощности (a), модулей напряжений (1;2) и токов (кривые 3;4) (b) при $R = 7G = 0.48$ для пяти ШР, обеспечивающих минимальное значение потерь ХХ. Кривые 1,3 здесь и в дальнейшем соответствуют однородной линии без дополнительных сосредоточенных элементов.

Физический смысл происходящего на качественном уровне достаточно очевиден. В линии с включенными реакторами происходит выравнивание напряжений вдоль линии и одновременное снижение значений модуля тока, за счет чего и происходит уменьшение мощности магнитного и увеличение мощности электрического поля всей линии. Напомним, что суммарные потери в проводах определяются двумя компонентами: активные (омические) потери Ri^2 и потери, обусловленные утечкой тока через несовершенную изоляцию Gu^2 . Поскольку $R > G$, то перераспределение составляющих электромагнитного поля и позволяет добиться минимизации общих потерь. Для неисккажающей линии этого эффекта уже нельзя достичь, поскольку для них в безразмерном виде имеем $R = G$. Этот пример сравнительного анализа результатов расчета является хорошей иллюстрацией тех явных преимуществ, которые дает переход к безразмерным переменным [8].

Таблица 2.1. Потери ХХ в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов или ИРМ, включенных в полуволновую линию.

Кол-во КУ	x_k	L_n	$P_0/P_n, \%$	x_k	C_n	$P_0/P_n, \%$
1	0.25	∞	13.58	0.25	∞	13.58
1	0.22638	0.00245	6.74	0.46029	0.11817	13.53
2	0.15533 0.36912	0.09390 0.04890	4.27	0.45535 0.47161	0.24704 0.15124	13.53
3	0.11292 0.24922 0.41186	0.15969 0.12447 0.10067	3.40	0.00000 0.00000 0.49621	0.57724 0.61198 0.96338	13.43
4	0.08841 0.18948 0.30489 0.43314	0.21997 0.18807 0.16192 0.14649	3.00	0.00000 0.00115 0.48868 0.50000	0.56071 0.67903 0.93410 0.48271	13.49
5	0.07706 0.16118 0.24786 0.34926 0.45146	0.25316 0.25289 0.22467 0.18798 0.21637	2.28	0.00000 0.00001 0.00001 0.00021 0.00052	1.08447 0.45487 1.49851 0.91257 0.39859	13.11

Таблица 2.2. Потери ХХ в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов или ИРМ, включенных в четвертьволновую линию.

Кол-во КУ	x_k	L_n	$P_0/P_n, \%$	x_k	C_n	$P_0/P_n, \%$
1	0.125	∞	1458.9	0.125	∞	1458.9
1	0.16217	0.10119	2.87	0.00000	0.48387	60.20
2	0.09568 0.19773	0.20777 0.19691	1.97	0.00000 0.00000	1.51370 0.94687	85.52
3	0.06786 0.13912 0.21276	0.30754 0.29372 0.28677	1.75	0.03246 0.03246 0.07716	1.60984 0.00253 0.01658	0.26
4	0.05314 0.11014 0.16520	0.38617 0.37512 0.41541	1.67	0.00000 0.00650 0.00650	0.42379 0.02427 0.17994	0.13

	0.22073	0.36984		0.01499	0.32825	
5	0.04413 0.08972 0.13610 0.18218 0.22719	0.47755 0.48316 0.45735 0.49357 0.47919	1.62	0.00129 0.00129 0.00159 0.01429 0.14792	0.24725 0.16917 0.43684 0.12460 0.01353	0.29

Таблица 2.3. Потери ХХ в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов или ИРМ, включенных в линию с волновой длиной 1/8.

Кол-во КУ	x_k	L_n	$P_0/P_n, \%$	x_k	C_n	$P_0/P_n, \%$
1	0.06	∞	3.58	0.25	∞	3.58
1	0.08293	0.25119	1.01	0.00000	0.63404	2.29
2	0.04953 0.09976	0.43598 0.43173	0.89	0.00000 0.00000	0.37061 0.41082	1.09
3	0.03527 0.07101 0.10698	0.61837 0.61225 0.60959	0.86	0.00000 0.00000 0.00000	0.33919 0.23981 0.34709	0.53
4	0.02792 0.05573 0.08342 0.11119	0.78128 0.80428 0.78987 0.79797	0.85	0.00431 0.00431 0.00438 0.00459	0.11847 0.19833 0.19509 0.16596	0.18
5	0.02235 0.04433 0.06712 0.09034 0.11338	1.00494 1.00472 0.93802 0.96340 0.95189	0.84	0.00007 0.00008 0.00017 0.00017 0.02523	0.15397 0.12380 0.15445 0.14623 0.17232	0.09

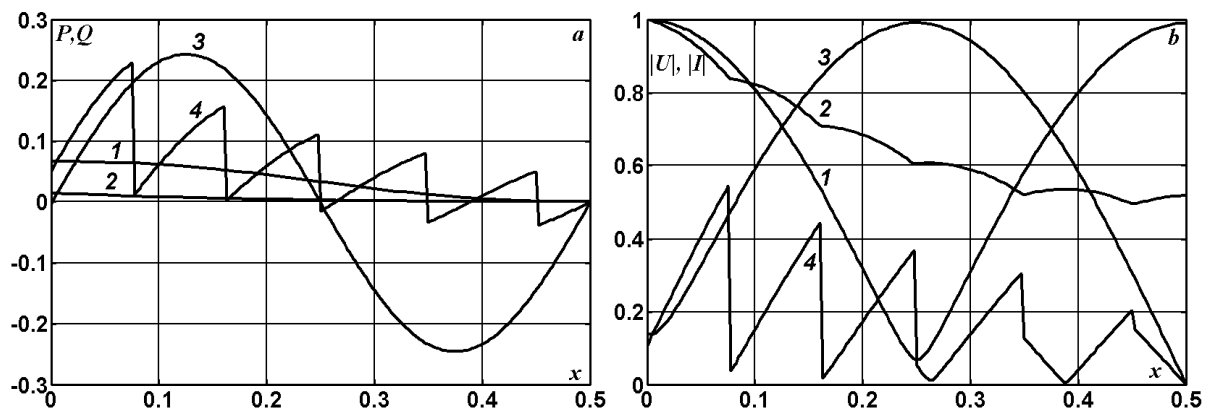


Рис. 2.2. Распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3;4) мощности (а), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (б) при $R = 7G = 0.48$ и включении пяти шунтирующих реакторов.

Считается, что полуволновая линия обладает таким замечательным свойством как сбалансированность по реактивной мощности, вследствие чего для ее работы отпадает необходимость в установке дополнительных компенсирующих устройств [9-12]. Посмотрим, так ли это на самом деле и можно ли увеличить одновременно и передаваем-

мую мощность и КПД с помощью шунтирующих реакторов, подобрав их мощности и месторасположение оптимальным образом

По вполне понятным причинам задача поиска оптимальных параметров КУ с целью уменьшения потерь в проводах при передаче натуральной мощности является намного сложнее. Здесь и в дальнейшем будем рассматривать полуволновую линию с потерями и замкнутую на чисто активную нагрузку $Z_S = Z_B = 1$, поскольку, как уже отмечалось ранее в этом случае КПД хоть и не на много, но выше, чем в режиме бегущих волн при передаче энергии прямой волной в согласованную нагрузку: $Z_S = Z_0 = 1.0009 - j0.0327$. Целенаправленный поиск будем осуществлять по методу конфигураций в пространстве переменных x_k , L_n не накладывая пока никаких ограничений на месторасположение реакторов или на максимальные напряжения вдоль всей линии, поскольку интересно посмотреть к каким результатам это может привести.

Включение в полуволновую линию 3...4 реакторов позволяет уменьшить активные потери более чем на 3%, если при этом не накладывать ограничений на перепады напряжения вдоль линии (таблица 2.4). Дальнейшее увеличение числа КУ не способствует увеличению КПД.

На рис. 2.3 дано распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3;4) мощности (a), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (b) при включении четырех шунтирующих реакторов, последний из которых оказывается «прижатым» к приемнику. Как видим из представленных результатов, уменьшение потерь сопровождается, к сожалению, увеличением реактивной мощности во всей линии и в частности, на ее отправном конце. Здесь генератор начинает потреблять реактивную мощность (см. кривую 4), что всегда крайне нежелательно, поскольку приводит к его ускоренному износу.

Ситуация чудесным образом меняется в благоприятную сторону, если ограничить величиной 1.05 максимум модуля напряжения в электрической цепи (таблица 2.5, рис. 2.4). С учетом 5% -го ограничения на превышение напряжения в линии эффект от включения шунтирующих реакторов снижается до 1.8%, но зато первый реактор «прижавшись» к источнику напряжения заставляет генератор уже не потреблять, а отдавать реактивную мощность в линию ($Q = 0.04$ при $x = 0$). Полученный при этом выигрыш в КПД все равно получается достаточно весомым.

Если предположить, что изоляция полуволновой линии идеальна: $G = 0$, то в такой линии с более сильной дисперсией волн эффект усиливается до 2 % по сравнению с однородной линией (таблица 2.6). Для нагруженной неискажающей линии ($R = G$), где имеет место только диссипация волн, уменьшить потери также невозможно, как и в режиме XX.

Таблица 2.4. Максимальные значения передаваемой мощности и КПД в зависимости от количества, месторасположения и параметров реакторов.

Кол-во КУ	x_k	L_n	P_1	η , %
1	0.25	∞	0.38000	76.033
1	0.27921	0.35344	0.38618	77.237
2	0.23540 0.43754	0.28354 0.42204	0.39166	78.331
3	0.19028 0.32904 0.50000	0.36976 0.34469 0.36019	0.39568	79.136

4	0.17687	0.48660	0.39594	79.188
	0.28016	0.84034		
	0.33871	0.49917		
	0.49976	0.43407		

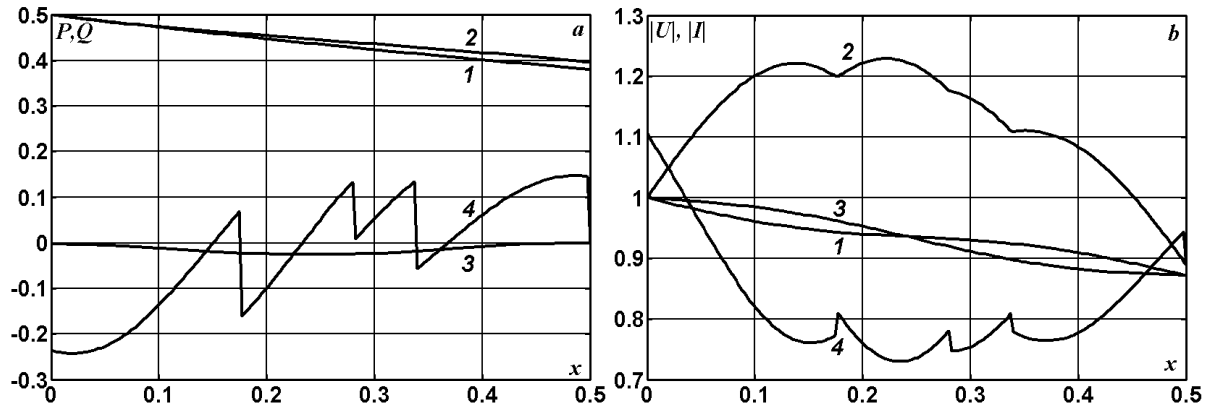


Рис. 2.3. Распределение вдоль полуволновой линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3;4) мощности (а), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (b) при включении четырех шунтирующих реакторов.

Таблица 2.5. Максимальные значения передаваемой мощности и КПД в зависимости от месторасположения и значений индуктивности четырех шунтирующих реакторов при соблюдении ограничения: $\max_{x \in [0, l]} |U(x)| \leq 1.05$.

Кол-во КУ	x_k	L_n	P_1	$\eta, \%$
1	0.25	∞	0.38000	76.033
4	0.00153 0.16895 0.29023 0.47255	0.61539 0.82961 0.71337 0.78460	0.38912	77.824

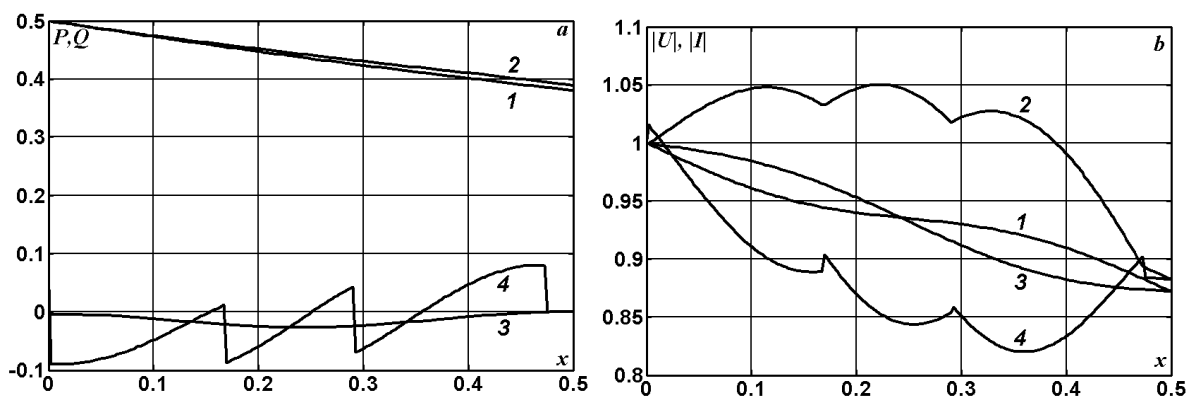


Рис. 2.4. Распределение вдоль линии активной (кривые 1;2) и реактивной (3,4) мощности (а), модулей напряжений (1;2) и токов (3;4) (b) при включении четырех шунтирующих реакторов и соблюдении ограничения: $\max_{x \in [0, l]} |U(x)| \leq 1.05$.

Таблица 2.6. Максимальные значения передаваемой мощности и КПД в зависимости от месторасположения и значений индуктивности четырех шунтирующих реакторов для полуволновой линии с идеальной изоляцией ($G = 0$) при соблюдении ограничения: $\max_{x \in [0, l]} |U(x)| \leq 1.05$.

Кол-во КУ	x_k	L_n	P_1	η , %
1	0.25	∞	0.39326	78.690
4	0.00003 0.15256 0.28372 0.46822	0.92998 0.82858 0.84911 0.73522	0.40340	80.680

Заключение

1. Выведены расчетные соотношения для определения напряжений, токов, активной и реактивной мощности в установившемся режиме цепи переменного напряжения с распределенными и сосредоточенными параметрами. Включение шунтирующих реакторов и ИРМ в виде конденсаторных батарей позволяет снизить потери ХХ в несколько раз для линий с различной волновой длиной.

2. При передаче натуральной мощности по полуволновой линии КПД удастся увеличить более чем на 3% при отсутствии ограничений на превышение напряжений и на 1.8%, если таковые ограничить предельным значением в 1.05. Подключение КУ к неисккажающей линии не приводит к уменьшению потерь в ней.

V. Pațiuș. D.ș.f.-m. conferențiar universitar la Universitatea de Stat a Moldovei, cercetător științific la Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice: metode numerice de calcul, fizica matematică, mecanica și electrotehnica teoretică. Autor a peste 100 lucrări științifice, inclusiv 10 monografii.

Литература

1. Круг К.А. Основы электротехники. – Л.: ОНТИ, 1936. – 888с.
2. Александров Г.Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях. – С.-Петербург: Центр подготовки кадров энергетики. Типография «Светоч», 2003. – 192с.
3. Александров Г. Н. Передача электрической энергии. – С.-П.: Изд-во Политехнического университета, 2007. – 412с.
4. Александров Г.Н., Ле Тхань Бак. Уменьшение потерь мощности в дальних линиях электропередачи с управляемыми реакторами. – Электричество, 2007, №3, с. 8-15.
5. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И. и др. Волновые явления в неоднородных структурах. Т.5. Теория и методы расчета электрических цепей, электромагнитных полей и защитных оболочек АЭС. – Кишинев: Типография АНМ, 2008. – 664 с.
6. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2004.
7. Евдокунин Г.А., Дмитриев М., Гольдштейн С. и др. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели. – Новости Электротехники, 2008, № 4 (52).
8. Кадомская К. Высоковольтные ВЛ. Эффективность и управляемость шунтирующих реакторов. – Новости Электротехники, 2008, № 4(52).

9. Бушуев В.В., Путилова А.Т., Самородов Г.И. Сверхдальние электропередачи. – Известия Академии наук РФ. Энергетика, 1994, № 2, с. 12 – 17.
10. Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В. и др. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ Европейской части СССР. – Электричество, 1968, № 8, с. 10–16.
11. Дикой В.П., Зильберман С.М., Кучеров Ю.Н. и др. Организация полуволновой связи «Сибирь-Урал» на современном этапе. – Новое в российской электроэнергетике, 2002, № 12, с. 5-15.
12. Справочник по проектированию линий электропередачи. Под ред. М.А. Реута и С.С. Рокотяна. – М.: Энергия, 1980. – 296 с.