

УДК 621.311

Реактивная мощность кабельных линий электропередачи

Коледа-Сакович Д.Г.

Научный руководитель – к.т.н., доцент РАДКЕВИЧ В.Н.

В системах электроснабжения промышленных предприятий для передачи и распределения электроэнергии на напряжении до 1 кВ и 6-10 кВ применяются многожильные и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабельные линии электропередачи обладают индуктивным сопротивлением и емкостной проводимостью. Следовательно, линии потребляют и генерируют реактивную мощность.

В рабочих режимах при передаче электроэнергии в линиях возникают потери реактивной мощности (квар), которые при симметричных нагрузках определяются по формуле

$$\Delta Q_{\text{л}} = 3I_p^2 \cdot x_0 \cdot l \cdot 10^{-3}, \tag{1}$$

где I_p – расчетный (рабочий) ток линии, А;

x_0 – погонное реактивное сопротивление токопроводящей жилы (ТПЖ) кабеля, Ом/км

l – длина линии электропередачи, км.

Значение x_0 для кабелей вычисляется по формуле

$$x_0 = 2\pi \cdot f \cdot L_0, \tag{2}$$

где f – частота переменного тока, Гц;

L_0 – индуктивность проводника, Гн/км.

С учетом (2) потери реактивной мощности в трехфазной линии электропередачи определяются по выражению

$$\Delta Q_{\text{л}} = 3I_p^2 \cdot \omega L_0 \cdot l \cdot 10^{-3}. \tag{3}$$

Для многожильного кабеля с симметричным расположением жил или трех одножильных небронированных кабелей, размещенных вплотную друг к другу по треугольнику, индуктивность цепи, Гн/км, можно рассчитать по формуле [1]

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{S}{r} + 0,25 \right) 10^3, \tag{4}$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

S – расстояние между центрами жил соседних кабелей, мм;

r – радиус токопроводящей жилы кабеля, мм.

При несимметричном расположении одножильных кабелей (в одной плоскости) или ТПЖ многожильных кабелей расчет индуктивности выполняют по аналогичной формуле с использованием среднегеометрического расстояния S_c между центрами соседних ТПЖ, определяемого по выражению

$$S_c = \sqrt[3]{S_{12} \cdot S_{23} \cdot S_{13}}, \tag{5}$$

где S_{12} , S_{23} и S_{13} – соответственно расстояние между центрами жил кабелей фаз $L1$ и $L2$, $L2$ и $L3$, $L1$ и $L3$.

Значения L_0 и x_0 в справочной литературе приводятся для определенного конструктивного исполнения многожильных кабелей или кабельной линии с одножильными кабелями [1].

Для одножильных кабелей напряжением выше 1 кВ x_0 обычно даются при их расположении треугольником и в одной плоскости. Иные расположения одножильных кабелей не предусматриваются. Следовательно, для других раскладок кабелей численные данные x_0 определяются приближенно расчетным путем.

Реактивная мощность, генерируемая линией электропередачи, зависит от ее конструктивных параметров и напряжения. Так как величина напряжения в разных точках линии неодинаковая, то расчет генерируемой линией реактивной мощности (зарядной мощности) Q_B , квар, производится при номинальном напряжении по формуле

$$Q_B = q_0 \cdot l, \quad (6)$$

где q_0 - удельная (погонная) зарядная мощность линии электропередачи, квар/км.

Среднее значение q_0 для линий электропередачи принимается по справочным данным. Более точно величину q_0 можно рассчитать по следующему выражению:

$$q_0 = U_{ном}^2 \cdot b_0 \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение линии электропередачи, В;

b_0 - удельная емкостная проводимость линии, 1/(Ом·км).

Тогда зарядная мощность линии

$$Q_B = U_{ном}^2 \cdot b_0 \cdot l \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Удельную емкостную проводимость линии определяют по выражению

$$b_0 = \omega \cdot C_0, \quad (9)$$

где C_0 - удельная емкость линии, Ф/км.

Следовательно, зарядная мощность линии вычисляется как

$$Q_B = U_{ном}^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot l \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

Удельная емкость, мкФ/км, одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена определяется по следующей формуле:

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln \frac{D}{d}}, \quad (11)$$

где ε - относительная удельная проницаемость сшитого полиэтилена, $\varepsilon = 2,3$;

D - расчетный наружный диаметр кабеля, мм;

d - расчетный диаметр ТПЖ, включая экран, мм.

Для иллюстрации в таблице 1 приведены значения L_0 , x_0 и C_0 для одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ на напряжение 10 кВ при прокладке их по треугольнику и в одной горизонтальной плоскости [1].

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что при расположении одножильных кабелей в одной плоскости их индуктивности и реактивные сопротивления для любых

сечений ТПЖ значительно выше, чем при расположении треугольником. Как следует из таблицы 1, значения удельных емкости кабелей не зависят от способа их раскладки [1].

Таблица 1 – Индуктивные и емкостные характеристики одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением 10 кВ

Сечение жилы, мм ²	При прокладке треугольником			При прокладке в горизонтальной плоскости		
	L_0 , мГн/км	x_0 , Ом/км	C_0 , мкФ/км	L_0 , мГн/км	x_0 , Ом/км	C_0 , мкФ/км
50	0,400	0,126	0,229	0,535	0,168	0,229
70	0,376	0,118	0,258	0,511	0,160	0,258
95	0,353	0,111	0,294	0,487	0,153	0,294
120	0,338	0,106	0,323	0,472	0,148	0,323
150	0,323	0,101	0,357	0,457	0,143	0,357
185	0,312	0,098	0,387	0,445	0,140	0,387
240	0,300	0,094	0,429	0,433	0,136	0,429
300	0,285	0,089	0,478	0,418	0,131	0,478
400	0,275	0,086	0,531	0,407	0,128	0,531
500	0,267	0,084	0,584	0,398	0,125	0,584
630	0,262	0,082	0,644	0,394	0,124	0,644
800	0,252	0,079	0,727	0,383	0,120	0,727

В тех случаях, когда $\Delta Q_n > Q_B$, линия является потребителем реактивной мощности, а если $\Delta Q_n < Q_B$ - источником реактивной мощности. При равенстве $\Delta Q_n = Q_B$ имеет место естественный режим работы линии электропередачи.

Определим ток, соответствующий естественному режиму линии I_0 , из равенства выражения (3) и (10):

$$3I_0^2 \cdot \omega L \cdot l \cdot 10^{-3} = U_{ном}^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot l \cdot 10^{-3}. \tag{12}$$

Решив уравнение (12) относительно I_0 , получим

$$I_0 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}}. \tag{13}$$

При расчете по формуле (13) напряжение должно быть выражено в вольтах, удельная индуктивность - в Гн/км, удельная емкость - в Ф/км.

Номинальное фазное напряжение линии электропередачи определяется как

$$U_{номф} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}. \tag{14}$$

С учетом (14) выражение (13) можно представить в виде

$$I_0 = U_{номф} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}}. \tag{15}$$

Волновое сопротивление линии электропередачи

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (16)$$

Тогда ток линии, А, при котором имеет место натуральный режим линии ($\Delta Q_{\text{л}} = Q_{\text{в}}$) можно записать в виде такого выражения:

$$I_0 = \frac{U_{\text{номф}}}{Z_0}. \quad (15)$$

При расчете по формуле (15) напряжение $U_{\text{номф}}$ должно быть выражено в вольтах, а сопротивление Z_0 – в омах.

Если рабочий ток линии электропередачи $I_p < I_0$, то линия генерирует реактивную мощность. При $I_p > I_0$ линия потребляет реактивную мощность.

В таблице 2 приведены результаты расчетов значений Z_0 и I_0 для кабелей, технические характеристики которых показаны в таблице 1. Для сравнения в таблице 2 даны допустимые токи кабелей $I_{\text{доп}}$ при нормированных условиях открытой прокладки в воздухе.

Таблица 2 – Волновые сопротивления и токи одножильных кабелей с алюминиевой жилой с изоляцией из СПЭ напряжением 10 кВ при прокладке в воздухе

Сечение жилы, мм ²	При прокладке треугольником			При прокладке в горизонтальной плоскости		
	Z_0 , Ом	$I_{\text{доп}}$, А	I_0 , А	Z_0 , Ом	$I_{\text{доп}}$, А	I_0 , А
50	41,8	185	138,3	45,3	225	119,7
70	38,2	230	151,3	44,5	280	129,9
95	34,7	300	166,6	40,7	349	142,0
120	32,3	346	179,0	38,2	403	151,3
150	29,2	392	198,0	35,8	452	161,5
185	28,4	450	203,5	33,9	518	170,5
240	25,1	531	230,3	31,8	607	181,8
300	24,4	609	236,9	29,6	693	195,3
400	22,8	710	253,5	27,7	787	208,7
500	21,4	822	270,1	26,1	900	221,5
630	20,2	954	286,1	24,7	1026	234,0
800	18,6	1094	310,8	23,0	1161	251,3

Кабели выбираются по допустимому нагреву длительным расчетным током в нормальном и послеаварийном режимах с учетом условий эксплуатации. Реальные нагрузки линии могут быть меньше значений I_0 , при которых кабельные линии будут являться источниками реактивной мощности.

Заключение

Кабельные линии электропередачи напряжением до 1 кВ и 6-10 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий в зависимости от нагрузки могут, как потреблять, так и генерировать реактивную мощность. Выбор средств компенсации реактивной мощности с учетом потребляемой и генерируемой реактивной мощности кабельных линий электропередачи позволяет снизить затраты на электроснабжение производственных объектов.

Литература

1. Инструкция по эксплуатации кабелей из сшитого полиэтилена на напряжение 6, 10, 20, 35 кВ. Издание 2. - ОАО «Электрокабель «Кольчугинский завод». 2008. - 39с.