

УДК 621.311

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ИСТОЧНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Коледа-Сакович Д.Г.

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

В системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий для передачи и распределения электроэнергии на напряжении до 1 кВ и 10(6) кВ широко применяются кабельные линии. Для распределения электроэнергии на напряжении 10 или 6 кВ используются трехжильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) и с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ). Одножильные кабели в электрических сетях напряжением до 1 кВ и 6-10 кВ используются при больших нагрузках, когда пропускной способности многожильных кабелей недостаточно для электроснабжения потребителей электроэнергии. Кабельные линии электропередачи обладают индуктивным сопротивлением и емкостной проводимостью. Следовательно, линии потребляют и генерируют реактивную мощность.

На рисунке 1 показаны схемы емкостей в одножильном и трехжильном кабелях. Величина емкостного тока в одножильном кабеле обусловлена емкостью относительно земли (заземленной металлической оболочки или экрана).

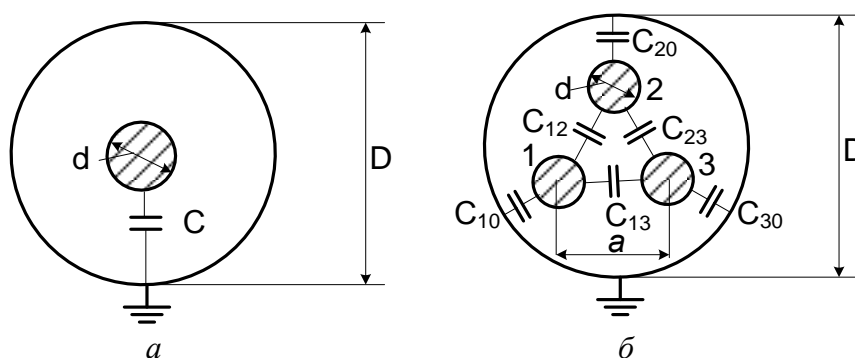


Рисунок 1. Схемы емкостей в одножильном (а) и трехжильном (б) кабелях:
 C – емкость одножильного кабеля; C_{10} , C_{20} , C_{30} – частичные емкости жил на землю;
 C_{12} , C_{23} , C_{13} – частичные емкости между жилами

Удельная емкость, мкФ/км, одножильного и отдельных экранированных токопроводящих жил (ТПЖ) многожильного кабеля определяется по следующей формуле [1]:

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln \frac{D}{d}}, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции;
 D – расчетный наружный диаметр кабеля, мм;
 d – расчетный диаметр ТПЖ, включая экран, мм.

В соответствии с [2] для сшитого полиэтилена $\varepsilon=2,3$. Из выражения (1) следует, что чем больше отношение D/d , тем меньше значение C_0 .

В трехжильном кабеле емкости токопроводящих жил (ТПЖ) зависят от взаимного расположения жил относительно друг друга, а также от их расположения по отношению к земле или заземленным элементам кабеля. Емкость кабеля определяется с учетом частичных емкостей.

Емкость трехжильного кабеля с поясной изоляцией в общей металлической оболочке (алюминиевой или свинцовой) или с экраном выражается через частичные емкости между ТПЖ C_{12} , C_{23} , C_{13} и каждой жилы относительно заземленной оболочки C_{10} , C_{20} , C_{30} . Вследствие симметричной конструкции трехжильного кабеля $C_{12} = C_{23} = C_{13}$ и $C_{10} = C_{20} = C_{30}$. Электрическая емкость каждой ТПЖ относительно двух других жил

$$C_1 = C_{10} + C_{12} + C_{13}. \quad (2)$$

Так как $C_{12} = C_{13}$, то можно выражение (2) представить в виде

$$C_1 = C_{10} + 2C_{12}. \quad (3)$$

Частичные емкости определяются по следующим соотношениям:

- между двумя ТПЖ

$$C_{12} = 0,23C_1, \quad (4)$$

- между ТПЖ и оболочкой (или экраном)

$$C_{10} = 0,53C_1. \quad (5)$$

Из-за взаимного экранирования рабочая емкость трехжильного кабеля не равна утроенному значению емкости ТПЖ, а определяется по выражению [1]

$$C_0 = C_{10} + 3C_{12} = 1,23C_1. \quad (6)$$

Рабочая емкость, мкФ/км, трехжильного кабеля может быть найдена по следующей эмпирической формуле [1]:

$$C_0 = \frac{0,048\varepsilon}{\lg \frac{3a^2(D^2 - a^2)^3}{d^2(D^6 - a^6)}}, \quad (7)$$

где a - расстояние между центрами ТПЖ кабеля, мм.

Емкостное реактивное сопротивление кабеля, Ом/км, вычисляется по выражению

$$x_0 = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_0}, \quad (8)$$

где C_0 - емкость кабеля, Ф/км;

f - Частота тока, Гц.

Емкостная проводимость кабельной линии, $1/(\text{Ом} \cdot \text{км})$, является величиной, обратной X_c :

$$b_0 = \omega C_0 = 2\pi \cdot f \cdot C_0. \quad (9)$$

Приближенное значение b_0 можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$b_0 = \frac{26,5}{\lg \frac{D}{d}}. \quad (10)$$

При включении трехфазной линии электропередачи под напряжение в ней имеет место зарядная мощность, удельное (погонное) значение которой, квар/км, вычисляется по выражению

$$q_0 = U_{ном}^2 \cdot b_0 \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

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

Реактивная мощность, квар, генерируемая линиями электропередачи рассчитывается по формуле

$$Q_B = q_0 \cdot l, \quad (12)$$

С учетом выражений (9) и (11) формулу (12) можно записать в таком виде:

$$Q_B = U_{ном}^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot l \cdot 10^{-3}. \quad (13)$$

где l – длина линии электропередачи, км.

Зарядная мощность линии зависит от ее напряжения и конструктивного исполнения. Средние значения C_0 , b_0 и q_0 приводятся в справочной литературе и технической документации производителей кабельной продукции.

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

$$\Delta Q_x = 3I_p^2 \cdot x_0 \cdot l \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

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

x_0 - погонное реактивное сопротивление ТПЖ кабеля, Ом/км.

При $l = 1$ км потери реактивной мощности в линии, квар/км, вычисляются по выражению

$$\Delta q_x = 3I_p^2 \cdot x_0 \cdot 10^{-3}. \quad (15)$$

Значение x_0 для кабелей принимают по справочной литературе или находят по формуле

$$x_0 = 2\pi \cdot f \cdot L_0, \quad (16)$$

где f – частота переменного тока, Гц;

L_0 – индуктивность проводника, Гн/км.

При выполнении условия

$$Q_B > \Delta Q_x \quad (17)$$

кабельная линия является источником реактивной мощности.

Оценим, соблюдается ли соотношение (17) в реальных электрических сетях промышленных предприятий. Для выяснения данного вопроса рассмотрим линии напряжением 10 кВ, выполненные кабелями с БПИ. Расчетный ток линии в нормальном режиме определим по выражению

$$I_p = k_n \cdot I_{доп}, \quad (18)$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый длительный ток линии, А;
 k_n – коэффициент нагрузки линии.

Величина k_n в рабочем режиме линии варьируется в диапазоне от 0 до 1. Расчет выполним для $k_n=0,8$, что соответствует предельному значению k_n для линий, которые могут перегружены в послеаварийном режиме. Приняв значения $I_{\text{доп}}$ по [4] для трехжильных кабелей с БПИ, прокладываемым в земле, а b_0 и x_0 – по [3], рассчитаем по формулам (11) и (15) q_0 и Δq_L . Определим также критериальную функцию для оценки режима реактивной мощности кабельной линии

$$\delta q = q_0 - \Delta q_L. \quad (19)$$

При $\delta q > 0$ линия генерирует, при $\delta q < 0$ реактивную мощность. В случае $\delta q = 0$ имеет место естественный режим работы линии электропередачи.

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Реактивные параметры кабельной линии при $k_n=0,8$

Сечение жилы, мм ²	b_0 , 10 ⁻⁶ /Ом·км	x_0 , Ом/км	I_p , А	q_0 , квар/км	Δq_L , квар/км	δq , квар/км
25	72,2	0,099	72,0	7,2	1,5	5,7
35	85,0	0,095	92,0	8,5	2,4	6,1
50	91,0	0,090	112,0	9,1	3,4	5,7
70	97,5	0,086	132,0	9,8	4,5	5,3
95	110,0	0,083	164,0	11,0	6,7	4,3
120	116,0	0,081	192,0	11,6	9,0	2,6
150	138,0	0,079	220,0	13,8	11,5	2,3
185	141,0	0,077	248,0	14,1	14,2	-0,1
240	144,0	0,075	284,0	14,4	18,1	-3,7

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что распределительные линии напряжением 10 кВ, которые, как правило, выполняются кабелями с ТПЖ сечением до 150 мм², даже при $k_n=0,8$, можно рассматривать как источники реактивной мощности. Реальные значения k_n могут быть значительно меньше 0,8, а величины δq существенно больше.

Резюмируя, можно сделать вывод о целесообразности учета реактивной мощности, генерируемой кабельными линиями электропередачи напряжением выше 1 кВ, при выборе батарей статических конденсаторов, устанавливаемых в СЭС промышленных предприятий. Это будет способствовать снижению затрат на компенсацию реактивной мощности.

Литература

1. Бачелис, Д.С. Электрические кабели, провода и шнуры (справочник) / Д.С. Бачелис, Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян. – М.: «Энергия», 1971. – 704 с.
2. Инструкция по эксплуатации кабелей из сшитого полиэтилена на напряжение 6, 10, 20, 35 кВ. Издание 2. - ОАО «Электрокабель «Кольчугинский завод», 2008. - 39с.
3. Мельников, Н.А. Электрические сети и системы / Н.А. Мельников. – М.: «Энергия», 1975. – 464с.
4. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.