

Низкий коэффициент умножения и колоколообразная форма импульса (вместо прямоугольной) связаны, по нашему предположению, с наличием паразитных емкостей между линиями.

Емкость коаксиальных линий $C_1 = C_2 = \frac{0,55\epsilon L}{\ln D/d}$, их суммарная емкость при зарядке

линий C будет $\frac{4,4\epsilon L}{\ln D/d}$. При $D/d \approx e$ и $\epsilon \approx 2,5$

имеем $C \approx 11L$ [пФ]. Емкость при разрядке (емкость в ударе) равна $C_{be} \approx C/4 = 2,75$ пФ.

При срабатывании ключа K , т. е. при разрядке линий, между последними возникает напряжение, что ведет к зарядке паразитных емкостей C_{par} . Емкость C_{par} можно оценить по формуле емкости между проводами диаметром d

и длиной L : $C_{par} = \frac{0,12\epsilon L}{\ln 2a/d}$, a — расстояние между проводами. Для воздуха $\epsilon = 1$, но следует

учесть обычно покрывающий линии слой пластика толщиной $R - r$ (см. рис. 3) с $\epsilon \approx 2,5$.

Таким образом, суммарная паразитная емкость между линиями сравнима с емкостью в ударе самих формирующих элементов, так что существенная часть энергии при срабатывании КГМ идет на зарядку паразитных емкостей, в результате чего уменьшается коэффициент умножения КГМ и искажается форма импульса.

Литература

1. Месяц Г. А., Насибов А. С., Кремнев В. В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. — М.: Энергия, 1970.
2. Fitch R. A., Howell V. T. S./Proc. IEE. 1964. V. 111. № 4. P. 849—855.
3. Корон Е. Д.//ПТЭ. 1981. № 1. С. 124—125.
4. Бондарь Ю. Ф., Гоманько А. А., Кременцов В. И. и др.// Там же. 1991. № 1. С. 142—144.
5. Бондарь Ю. Ф., Мхеидзе Г. П., Петров Н. И.//КСФ ФИАН. 1999. № 3. С. 51.

Статья поступила в редакцию 19 октября 2004 г.

Cable Marx generator

Yu. F. Bondar, G. P. Mkheidze
General Physic Institute, Moscow, Russia

A 4 — stage cable Marx generator consisting of double axial cables has been manufactured. Measurements show that the voltage multiplication factor $k = U_{out}/U_0$ is much less than expected ($k = 2-3$ instead of $k \approx n = 4$), which is explained by the presence of a spurious capacitance between the generator stages.

УДК 537.3

Методика расчета параметров режимов рассредоточенных систем электроснабжения с протяженными кабельными линиями напряжением 6 кВ

И. А. Каримский
НТЦ "РАСЭЛ", Москва, Россия

Рассмотрена упрощенная методика расчета параметров режимов рассредоточенных (на местности) систем электроснабжения (СЭС) малой мощности с протяженными кабельными линиями (КЛ) 6 кВ, находящихся в собственности потребителей. В основу расчета, проводимого на этапе предварительного проектирования СЭС, положена П-образная схема замещения КЛ — расчетная модель линий в составе СЭС, адекватно отражающая происходящие в системе установившиеся нормальные процессы.

Электроснабжение современных узлов связи, крупных радиотехнических систем, автоматизированных средств управления систем жизнеобеспечения и других потребителей, удаленных от Центра, осуществляется от рассредоточенных СЭС, подключенных, как правило, к энергосистемам (ЭС). К таким системам, находящимся в собственности потребителей, предъяв-

ляются повышенные требования к надежности и бесперебойности питания, к качеству электроэнергии и электромагнитной совместимости электроприемников (ЭП). Поэтому в их состав входят собственно источники электроэнергии (ИЭ) — дизель-генераторы. Фрагмент функциональной структурной схемы такой СЭС приведен на рис. 1.

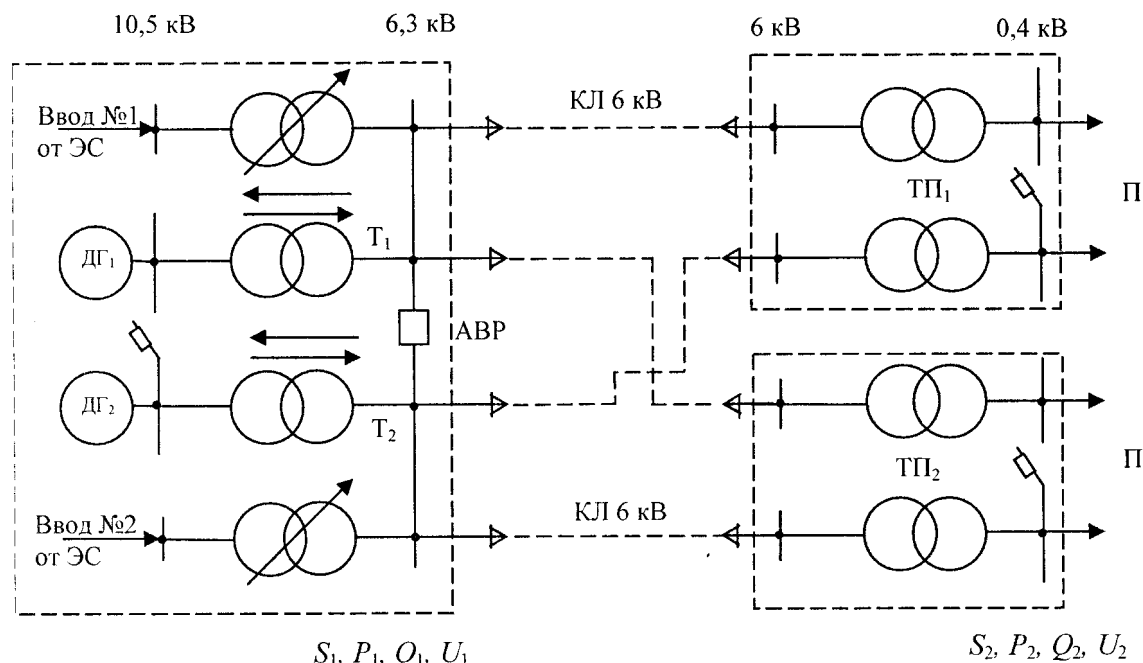


Рис. 1. Фрагмент функциональной структурной схемы СЭС

В результате анализа проектных решений и опыта эксплуатации выявлены следующие отличительные свойства рассматриваемых СЭС:

значительная длина (до 30 км) отдельных радиальных или радиально-магистральных (на рис. 1 не показаны) резервированных КЛ напряжением 6 кВ небольшого сечения (25, 35, 50 мм²);

суммарная длина КЛ распределительной сети СЭС, состоящей из 20 участков и более, достигает 300–400 км, рассредоточенных на площади 1500–2000 км²;

большая емкостная мощность, генерируемая всеми КЛ, соизмерима по величине с активной мощностью автономных дизель-генераторов (ДГ);

малые токи нагрузки (до 20–25 % от расчетного максимума), длительно протекающие по каждой КЛ при питании потребителей от энергосистемы в повседневных режимах;

повышенный (на 5–10 % сверх номинального) уровень напряжения в конце линий при малых нагрузках;

суммарная величина токов по четвертому пункту соответствует максимальной нагрузке автономных ДГ, ограниченной временем плановых и неплановых отключений вводов ЭС.

Выявленные особенности этих систем свидетельствуют об их отличии от СЭС общего назначения (промышленных, транспортных, городских и т. п.) и названных далее рассредоточенными.

В основе расчета параметров СЭС общего назначения напряжением 10 (6) кВ в установившихся режимах лежат методы, в которых учет выявленных свойств рассредоточенных СЭС, непосредственно зависящих от генерируемой кабельными линиями мощности, не предусмотрен [1–4]. А предложенная в работе [5] методика пригодна только для определения энергетиче-

ских показателей систем автономного электроснабжения (АСЭ), содержащих короткие линии между ИЭЭ и ЭП. В связи с этим актуально совершенствование известных методов определения основных параметров режимов таких СЭС рассматриваемой структуры на начальной стадии проектирования. Поскольку одновременное совместное применение ЭС и автономных ДГ в них не предусмотрено, то для решения поставленной задачи предлагается производить формирование простых математических моделей, описывающих раздельное использование ИЭЭ и пригодных для объяснения особенностей функционирования СЭС.

Общим в решении поставленных задач будем считать единый подход в применении такой схемы замещения кабельных линий напряжением 6 кВ, которая бы адекватно отражала связь между параметрами линий и режима работы СЭС в условиях значительной емкости Q_C независимо от рассматриваемого момента времени. С математической точки зрения эти задачи сводятся к решению алгебраических уравнений с комплексными переменными, вносящими в решение некоторые погрешности за счет введения следующих допущений:

1. Значения параметров режима (модулей мощности, токов, напряжений) отдельных фаз при питании по КЛ потребителей как от ЭС, так и автономных ДГ определяются в предположении существования в СЭС симметричных синусоидальных режимов.

2. Отходящие от центра питания (ЦП) СЭС кабельные линии имеют одинаковые суточные графики нагрузок независимо от вида источника электроэнергии, в общем случае с несовпадающими, но известными максимумами нагрузок.

3. Условия баланса активной и реактивной мощностей в системе обеспечиваются при питании потребителей от ЭС неограниченной мощности, а тем более от автономных ДГ за счет применения статических компенсирующих устройств (КУ) индуктивного (а не емкостного, как обычно) типа мощностью $Q_{КУ}$.

Рассмотрим этапы расчета параметров СЭС с учетом принятых допущений.

Обоснование схемы замещения
протяженных кабельных линий
напряжением 6 кВ

Легко проверить, что применение рекомендуемой в литературе [1, 2, 4] простейшей схемы замещения КЛ — 6 кВ активным сопротивлением (рис. 2, а) для рассредоточенных СЭС приводит к ошибочным результатам из-за неучета емкостной проводимости протяженных КЛ. Вместе с тем, через сопротивление r схемы замещения протекает рабочий ток $\dot{I}$, равный сумме тока нагрузки $\dot{I}_2$ и емкостного тока $\dot{I}_{C1}(\dot{I}_{C2})$. Так как рабочие и емкостные токи линий рассматриваемой СЭС, как установлено экспериментом,

соизмеримы, то последним пренебречь нельзя. Поэтому для изучения и оценки параметров указанного процесса подходит более сложная П-образная схема замещения*, состоящая из активного, реактивного сопротивлений и емкостной проводимости участка сети или сети в целом, что обеспечивает генерируемой кабельными линиями 6 кВ мощности Q_{C1} , Q_{C2} и емкостного тока $\dot{I}_{C1}$, $\dot{I}_{C2}$, сосредоточенных по концам схемы (см. рис. 2, б) и других параметров СЭС.

Формирование математических моделей
для решения частных задач

Используя метод математических аналогий и вышеприведенные допущения, примем для расчета параметров и режимов КЛ — 6 кВ известные в теории электрических систем формулы, составляющие основу математических моделей, используемые для определения параметров СЭС в зависимости от условий решаемых задач 1—3 и вариантов схемы замещения. Расчетные формулы сведем в справочную табл. 1, составляющую основу "Методики расчета параметров".

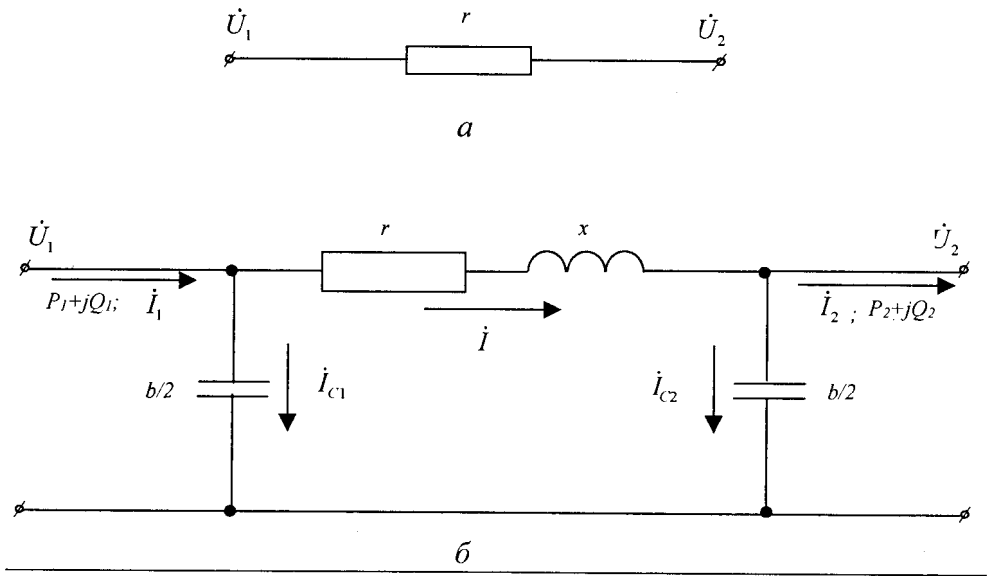


Рис. 2. Варианты схем замещения КЛ 6 кВ:
а — рекомендуемая известными методами; б — принятая в рассматриваемом методе

Таблица 1

Справочные формулы для решения частных задач и последовательность расчета

№ п/п	Параметры элементов СЭС	Параметр	Ед. изм.	Расчетная формула	
				схема заземления — рис. 2, а	схема замещения — рис. 2, б
1	Параметры линии	r	Ом	$r_0 l$	$r_0 l$
2		x	Ом	—	$x_0 l$
3		b	1/Ом	—	$b_0 l$
4		Q_C	квар	—	$U_H^2 b$
5		I_C	А	—	U_f^b
6		I_{C1}, I_{C2}	А	—	$I_C / 2$

* В традиционных методах расчета такая схема замещения применяется в расчетах параметров воздушных ЛЭП 110—220 кВ.

Окончание табл. 1

№ п/п	Параметры элементов СЭС	Параметр	Ед. изм.	Расчетная формула	
				схема заземления — рис. 2, а	схема заземления — рис. 2, б
7	Параметры нагрузки источника питания	I	А	I_2	$I_2 + I_{C2}$
8		I_1	А	I_2	$I_1 + I_{C1}$
9		P_1	кВт	$P_2 + \Delta P$	$P_2 + \Delta P$
10		Q_1	квар	—	$P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi$
11		S_1	кВА	P_1	$\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$
12		U_1	кВ	$U_2 + \Delta U$	$U_2 + \Delta U$
13		$\cos \varphi_1$		$\frac{P_1}{S_1}$	$\frac{P_1}{S_1}$
14	Потери мощности и напряжения в линии	ΔP	кВт	$\frac{P_2^2 r}{U_2^2}$	$\frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} r$
15		ΔQ	квар	$\frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} x$	$\frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_2^2} x$
16		ΔU	кВ	$\frac{P_2 r}{U_2}$	$\frac{P_2 r + (Q_2 - Q_{C2}) x}{U_2}$

Приведенные в табл. 1 формулы для двух различных схем замещения кабельных линий напряжением 6 кВ обеспечивают:

наглядность быстрого, качественного сравнения получаемых с их помощью результатов расчетов;

оценку влияния емкости протяженных КЛ на качественные характеристики их параметров.

Основные результаты решения задач

Применяя расчетные формулы для схемы замещения (см. рис. 2, б), легко определить искомые параметры и оценить влияние емкости протяженных КЛ на каждый из них. По известным параметрам, соответствующим максимальной

расчетной нагрузке, например $U_2, I_2, \cos \varphi_2$, нетрудно произвести по данным табл. 1 расчет параметров центра питания $U_2, I_2, \cos \varphi_1$, необходимые для построения векторной диаграммы напряжений и токов (одной фазы) при наличии емкостной проводимости КЛ (рис. 3, а). При ее построении учтено, что ток I_2 носит индукционный характер и отстает на угол φ_2 от фазного напряжения. Ток I_{C2} имеет емкостной характер, опережает напряжение на угол 90° и равен

$$I_{C2} = \frac{b}{2} \dot{U}_{2f}. \tag{1}$$

Напряжение в начале линии будет

$$\dot{U}_{1f} = \dot{U}_{2f} + \dot{I}_2 (r + jx). \tag{2}$$

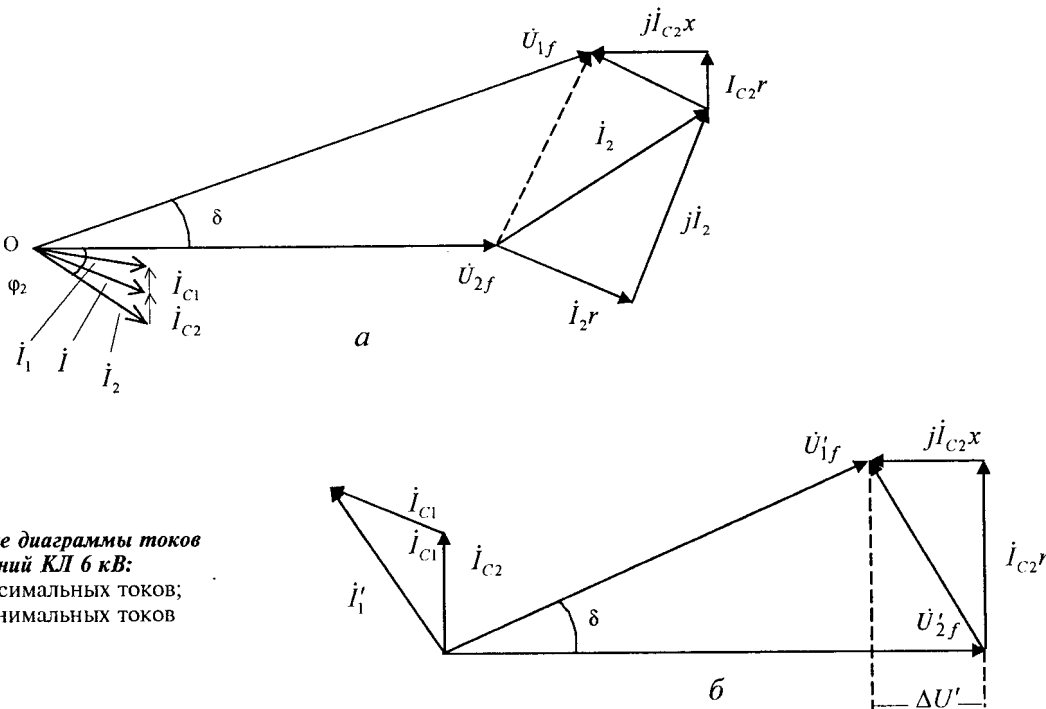


Рис. 3. Векторные диаграммы токов и напряжений КЛ 6 кВ:
а — режим максимальных токов;
б — режим минимальных токов

Из рассмотренного можно заключить, что емкость КЛ рассматриваемой СЭС благоприятно влияет на ее работу в режиме максимальных расчетных нагрузок, снижая потери мощности ΔS , ΔP , ΔQ и напряжения ΔU в кабельных линиях и увеличивая коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$. Это подтверждается результатами проведенных авторами расчетов для конкретных СЭС.

Опыт эксплуатации СЭС показал, что в режиме минимальных нагрузок напряжение в конце линий превышает номинальное. Это легко объяснить с помощью векторной диаграммы (см. рис. 3, б), построенной для случая, когда минимальный рабочий ток линии I'_2 стремится к нулю при тех же значениях емкостного тока I_{C2} . При этом фазное напряжение в начале линии $\dot{U}'_{1f}$

$$\dot{U}'_{1f} = \dot{U}'_{2f} + I_{C2}(r + jx). \quad (3)$$

Из этой диаграммы видно, что напряжение в конце линии $\dot{U}'_{2f}$ выше напряжения в ее начале

$$\dot{U}'_{2f} > \dot{U}'_{1f}, \quad (4)$$

т. е. при уменьшении тока нагрузки I'_2 до некоторой небольшой величины потеря напряжения в линии стремится к нулю, так как потеря напряжения от тока нагрузки компенсируется потерей напряжения от емкостных токов I_{C1} и I_{C2} (см. рис. 3, б). При дальнейшем уменьшении тока нагрузки до нуля напряжение в конце линии, превышая номинальное, становится больше, чем в ее начале, за счет отрицательной потери напряжения в КЛ. Отсюда следует, что в режиме наименьших нагрузок емкость КЛ отрицательно влияет на работу СЭС, а при холостом ходе, особенно при внезапном отключении нагрузки, емкостный ток вреден, так как в сети с изолированной нейтралью могут возникнуть опасные для изоляции КЛ и электроприемников СЭС перенапряжения.

Для определения параметров режима СЭС и параметров ДГ (S_G , P_G , Q_G , U_G) при кратковременной работе одного ДГ на суммарную минимальную нагрузку и емкость КЛ к параметрам линии необходимо прибавить параметры r_T , x_T схемы замещения обратимого трансформатора, влияющие на суммарные потери как мощности, так и напряжения в цепи питания потребителей.

При питании потребителей от ДГ соизмеримой мощности влияние емкости Q_2 на параметры режима ДГ усиливается, ибо уравниваются активная мощность ДГ и реактивная мощность КЛ. Оно выражается в перегрузке генератора зарядным током, который намагничивает дополнительно генератор, вызывая тем самым еще более значимое повышение напряжения U_2'' . Одна из причин происходящего — резонансные явления

в сети, которые могут переводить ДГ в режим неустойчивой работы, при котором внутреннее сопротивление автономного источника питания становится соизмеримым с полным сопротивлением питаемой цепи.

Следовательно, емкость КЛ в этом режиме также отрицательно влияет на работу СЭС, поэтому требуется решение дополнительно задачи (в статье не рассматривается) — задачи оптимизации баланса реактивной мощности в целях определения мощности устройств компенсации индуктивного типа Q_{KV} . В решении этой задачи важную роль играет степень компенсации реактивной мощности Q_C , которая может быть обоснована по критерию максимальной экономической эффективности функционирования рассматриваемых СЭС.

Выводы

1. Предложена усовершенствованная методика расчета параметров режимов рассредоточенных систем электроснабжения с протяженными кабельными линиями напряжением 6 кВ, генерирующими значительную емкостную мощность, не требующий сложных вычислений на раннем этапе проектирования.

2. Для расчетов обосновано применение П-образной схемы замещения КЛ — 6 кВ, адекватно отражающей происходящие в СЭС нормальные установившиеся процессы.

3. Разработанная методика с математической точки зрения обеспечивает, на наш взгляд, получение приемлемого результата путем решения известных в теории электрических систем алгебраических уравнений с комплексными переменными при учете принятых допущений.

4. Установлены положительные и отрицательные факторы влияния емкости КЛ на параметры СЭС в зависимости от величины расчетных нагрузок линий и вида используемого в текущий момент времени источника электроэнергии — энергосистемы или автономного дизель-генератора.

5. Дальнейшее развитие предложенной методики связано с последующей оценкой влияния параметров перспективных КУ на величину составляющих баланса реактивной мощности и на устойчивость работы СЭС рассматриваемой структуры.

Приложение

Пример расчета параметров режима рассредоточенных СЭС с кабельными линиями напряжением 6 кВ

Требуется определить параметры режима СЭС, выполненной десятью кабельными линиями длиной по 20 км каждая сечением 35 мм². По всем линиям, подключенным к центру питания (см. рис. 1), передается суммарная мощность $S_2 = 400 - j200$ кВА и ток $I_2 = 43,3$ А.

Решение производится для рассматриваемых выше схем замещения КЛ 6 кВ по формулам табл. 1. Результаты решения задачи в соответствии с последовательностью, указанной в табл. 1, сведен в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Схема замещения	
			рис. 2, а	рис. 2, б
1	r	Ом	10,8	10,8
2	x	Ом	—	1,58
3	b	1/Ом	—	$28 \cdot 10^{-3}$
4	Q_c	квар	—	370
5	Q_{c1}, Q_{c2}	квар	—	185
6	I_c	А	—	9,8
7	I_{c1}, I_{c2}	А	—	4,9
8	ΔP	кВт	47,9	56,55
9	ΔQ	квар	7,03	8,26
10	P_1	кВт	448	457
11	Q_1	квар	224	228,5
12	S_1	кВА	500	519
13	ΔU	В	720	674,6
14	U_1	В	6720	6674,6
15	I	А	43,3	48,2
16	I_1	А	43,3	53,1
При $P_2 = 0$				
17	ΔU	В	0	-44,7
18	U_1	В	6000	5955

Из анализа и сравнения данных табл. 2 следует, что:

параметры режимов СЭС (см. табл. 2, п.п. 8—18) имеют различные значения в зависимости от параметров соответствующей схемы замещения (см. табл. 2, п.п. 1—7);

при расчетах параметров режимов СЭС следует учитывать емкостную проводимость протяженных КЛ напряжением 6 кВ, существенно влияющую на величины реактивной нагрузки сети и других параметров.

Л и т е р а т у р а

1. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. — М.: Выс. шк., 1988.
2. Солдаткина Л. А. Электрические сети и системы. — М.: Энергия, 1972.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Карташев И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. — М.: МЭИ, 2001
5. Каримский И. А. Методика расчета энергетических показателей источников питания для систем автономного электроснабжения // Прикладная физика, 2002. № 2.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2003 г.

Procedure for calculation of modes parameters for the dispersed electrical power systems with extended 6-kV cable lines

I. A. Karimskii
RASEL Scientific & Technical Center, Moscow, Russia

The simplified procedure for calculation of modes parameters for dispersed surveyed (on a terrain) electrical low-power systems with extended 6-kV cable lines, with ones taking place in the customer property. In the basis of calculation, to be spent at a stage of preliminary designing of an electrical power system, there is the II-figurative equivalent circuit of a cable line. This settlement model of lines in a composition of a system has adequately reflected the steady-stated normal processes happening in a system.