

УДК 621.311.017

## УЧЕТ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ В РАСЧЕТАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–10 кВ

Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И.,  
канд. техн. наук, доц. ЗОЛОТОЙ А. А., инж. МАКАРЕВИЧ В. В.

*Белорусский национальный технический университет*

В последнее время в распределительных электрических сетях 6–10 кВ значительно возросла доля энергоисточников, находящихся на балансе потребителей, таких как блок-станции, мини-ГЭС, мини-ТЭЦ, ветроэнергетические, фотоэлектрические, парогазовые, газотурбинные и газопоршневые установки, биогазовые энергокомплексы и многие другие. Выросла доля потребительских энергоисточников, работающих параллельно с энергосистемой по диспетчерскому графику. Как правило, генерирующие источники потребителей, работающие параллельно с энергосистемой, снабжены автоматической системой регулирования напряжения в точке их подключения к электрической сети. Такие энергоисточники изменяют режимы работы распределительных электрических сетей энергосистемы, делают их комбинированными, влияют на потери электроэнергии в них. Поэтому влияние энергоисточников, находящихся на балансе потребителей, необходимо учитывать при расчетах распределительных электрических сетей. Традиционные подходы к расчетам разомкнутых электрических сетей 6–10 кВ не предусматривают задания в узлах генерирующих источников, способных регулировать напряжение. Для расчета режимов разомкнутых распределительных сетей с генерирующими источниками следует использовать подходы, применяющиеся при расчетах замкнутых электрических сетей, но при этом учитывать особенности топологии разомкнутых сетей. Из известных подходов к расчету нормальных режимов электрических сетей наиболее пригодным здесь является метод расчета электрической сети с двусторонним питанием. Сети с двусторонним питанием относят к разновидности замкнутых электрических сетей, но они могут иметь разомкнутую топологию. Расчет нормального режима электрической сети с двусторонним питанием, имеющей разомкнутую топологию, описан во всех известных учебниках по электрическим сетям, однако современные распределительные линии (РЛ) 6–10 кВ могут иметь источники питания более чем в двух узлах.

В статье предлагается способ расчета распределительных электрических сетей 6–10 кВ энергосистем, учитывающий дополнительные источники питания в одном или нескольких узлах сети.

Рассмотрим схему РЛ электрической сети 10 кВ, представленную на рис. 1. Схема состоит из 14 ветвей и 15 узлов, один из которых является центром питания (ЦП) схемы (узел 1). К узлам 6, 21, 23, 24, 32, 33, 41 и 51 подключены электрические нагрузки. Будем полагать, что мощности нагрузок в узлах РЛ каким-то образом оценены, определены или смоделированы и в данном случае заданы. Значения мощностей приведены в табл. 1. В узлах 6, 24 и 33 РЛ имеются генерирующие источники потребителей, оснащенные устройствами автоматического регулирования напряжения.

Сопротивления участков РЛ приняты одинаковыми и равными  $Z = 0,01 + j0,02$  Ом. В узле ЦП и узлах, в которых подключены генерирующие источники потребителей, заданы напряжения, равные номинальному напряжению сети – 10 кВ.

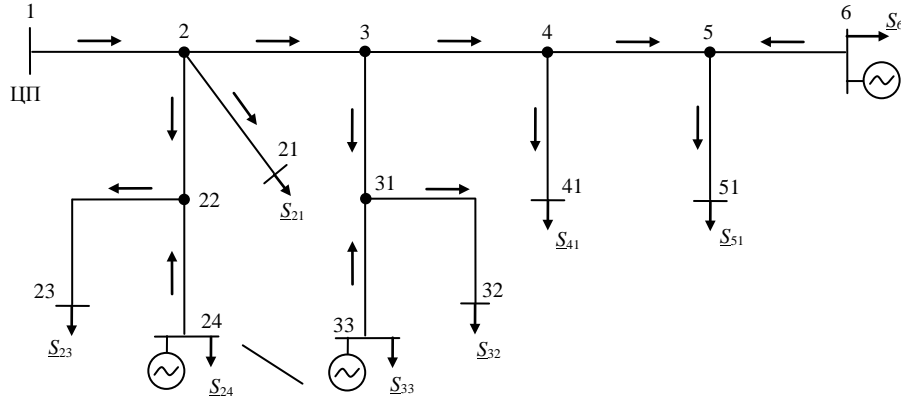


Рис. 1. Схема электрической сети 10 кВ

Таблица 1

Мощности нагрузок в узлах РЛ, представленной на рис. 1

| Узлы схемы РЛ | 6  | 21 | 23 | 24 | 32 | 33 | 41 | 51 |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $P$ , кВт     | 45 | 30 | 25 | 50 | 28 | 70 | 25 | 33 |
| $Q$ , квар    | 20 | 15 | 10 | 20 | 18 | 30 | 12 | 22 |

Если бы в узлах, например 24 и 33, схемы РЛ генерирующие источники потребителей, оснащенные устройствами автоматического регулирования напряжения, отсутствовали, то для определения потока мощности на головном участке схемы  $\underline{S}_{12}$ , без учета потерь, можно воспользоваться выражением, известным для электрических сетей с двусторонним питанием:

$$\underline{S}_{12} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_6}{\underline{z}_{16}} \underline{U}_n + \frac{\sum_{i=2}^5 \underline{S}_i \underline{z}_{i6}}{\underline{z}_{16}}, \quad (1)$$

где  $\underline{U}_1$  – напряжение в узле 1, являющемся центром питания схемы РЛ;  $\underline{U}_6$  – напряжение в узле 6 схемы РЛ, в котором подключен генерирующий источник потребителя;  $\underline{U}_n$  – номинальное напряжение РЛ;  $\underline{z}_{16}$  – суммарное сопротивление луча схемы РЛ между узлами 1 и 6:

$$\underline{z}_{16} = \underline{z}_{12} + \underline{z}_{23} + \underline{z}_{34} + \underline{z}_{45} + \underline{z}_{56}; \quad (2)$$

$\underline{z}_{i6}$  – суммарные сопротивления плеч схемы РЛ между узлами  $i$  и 6:

$$\left. \begin{aligned} \underline{z}_{26} &= \underline{z}_{23} + \underline{z}_{34} + \underline{z}_{45} + \underline{z}_{56}; \\ \underline{z}_{36} &= \underline{z}_{34} + \underline{z}_{45} + \underline{z}_{56}; \\ \underline{z}_{46} &= \underline{z}_{45} + \underline{z}_{56}; \\ \underline{z}_{56} &= \underline{z}_{56}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\underline{S}_i$  – мощности нагрузок  $i$ -х узлов схемы РЛ  $i = \overline{2,5}$ ;

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_2 &= \underline{S}_{2-22} + \underline{S}_{2-21}; \\ \underline{S}_3 &= \underline{S}_{3-31}; \\ \underline{S}_4 &= \underline{S}_{4-41}; \\ \underline{S}_5 &= \underline{S}_{5-51}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Однако в узлах 24 и 33 схемы РЛ генерирующие источники потребителей, оснащенные устройствами автоматического регулирования напряжения, имеются, что превращает данную линию в сеть с четырехсторонним питанием.

Для определения мощностей генерирующих источников потребителей в узлах схемы РЛ требуется составить уравнения второго закона Кирхгофа с учетом потоков уравнивающих мощностей для каждого луча схемы, соединяющего ЦП с генерирующими узлами РЛ:

$$\sum_i \underline{S}_{ij} \underline{z}_{ij} = 0, \quad (5)$$

где  $\underline{S}_{ij}$  – поток мощности по ветви  $i-j$  схемы РЛ;  $\underline{z}_{ij}$  – полное сопротивление ветви  $i-j$  схемы РЛ.

Для схемы РЛ (рис. 1) необходимо составить три уравнения. Произвольно зададимся направлениями потоков мощности во всех ветвях схемы РЛ. За положительное направление обхода лучей схемы РЛ между ЦП и генерирующими узлами примем направления от ЦП к генерирующим узлам. В итоге получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_{1-2} \underline{z}_{1-2} + \underline{S}_{2-22} \underline{z}_{2-22} - \underline{S}_{22-24} \underline{z}_{22-24} + \frac{(U_1 - U_{24}) U_{\text{ном}}}{\underline{z}_{1-24}} &= 0; \\ \underline{S}_{1-2} \underline{z}_{1-2} + \underline{S}_{2-3} \underline{z}_{2-3} + \underline{S}_{3-31} \underline{z}_{3-31} - \underline{S}_{31-33} \underline{z}_{31-33} + \frac{(U_1 - U_{33}) U_{\text{ном}}}{\underline{z}_{1-33}} &= 0; \\ \underline{S}_{1-2} \underline{z}_{1-2} + \underline{S}_{2-3} \underline{z}_{2-3} + \underline{S}_{3-4} \underline{z}_{3-4} + \underline{S}_{4-5} \underline{z}_{4-5} - \underline{S}_{5-6} \underline{z}_{5-6} + \frac{(U_1 - U_6) U_{\text{ном}}}{\underline{z}_{1-6}} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\underline{z}_{1-24}$ ,  $\underline{z}_{1-33}$ ,  $\underline{z}_{1-6}$  – суммарные сопротивления лучей схемы РЛ между узлами 1 и 24, 1 и 33, 1 и 6.

Выразим неизвестные потоки мощности в ветвях через мощности на грузок в узлах и неизвестные мощности, генерируемые в схему энергоисточниками потребителей  $\underline{S}_{r6}$ ,  $\underline{S}_{r24}$  и  $\underline{S}_{r33}$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_{31-33} &= \underline{S}_{33} - \underline{S}_{r33}; \\ \underline{S}_{3-31} &= \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} - \underline{S}_{r33}; \\ \underline{S}_{22-24} &= \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r24}; \\ \underline{S}_{2-22} &= \underline{S}_{23} + \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r24}; \\ \underline{S}_{5-6} &= \underline{S}_6 - \underline{S}_{r6}; \\ \underline{S}_{4-5} &= \underline{S}_6 + \underline{S}_{51} - \underline{S}_{r6}; \\ \underline{S}_{3-4} &= \underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} - \underline{S}_{r6}; \\ \underline{S}_{2-3} &= \underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33}; \\ \underline{S}_{1-2} &= \underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} + \underline{S}_{21} + \underline{S}_{23} + \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим уравнения:

$$\begin{aligned} & (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} + \underline{S}_{21} + \underline{S}_{23} + \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24}) \underline{z}_{1-2} + \\ & + (\underline{S}_{23} + \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r24}) \underline{z}_{2-22} - (\underline{S}_{24} - \underline{S}_{r24}) \underline{z}_{22-24} + \frac{\left( \underline{U}_1 - \underline{U}_{24} \right) U_{\text{nom}}}{\underline{z}_{1-24}} = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} + \underline{S}_{21} + \underline{S}_{23} + \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24}) \underline{z}_{1-2} + \\ & + (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33}) \underline{z}_{2-3} + (\underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} - \underline{S}_{r33}) \underline{z}_{3-31} - \\ & - (\underline{S}_{33} - \underline{S}_{r33}) \underline{z}_{31-33} + \frac{\left( \underline{U}_1 - \underline{U}_{33} \right) U_{\text{nom}}}{\underline{z}_{1-33}} = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} + \underline{S}_{21} + \underline{S}_{23} + \underline{S}_{24} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24}) \underline{z}_{1-2} + \\ & + (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33}) \underline{z}_{2-3} + \\ & + (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} + \underline{S}_{41} - \underline{S}_{r6}) \underline{z}_{3-4} + (\underline{S}_6 + \underline{S}_{51} - \underline{S}_{r6}) \underline{z}_{4-5} - \\ & - (\underline{S}_6 - \underline{S}_{r6}) \underline{z}_{5-6} + \frac{\left( \underline{U}_1 - \underline{U}_6 \right) U_{\text{nom}}}{\underline{z}_{1-6}} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим в (8)–(10) численные значения известных величин:

$$\begin{aligned} & (306 + j147 - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24})(0,01 + j0,02) + \\ & + (75 + j30 - \underline{S}_{r24})(0,01 + j0,02) - \\ & - (50 + j20 - \underline{S}_{r24})(0,01 + j0,02) + \frac{(10-10) \cdot 10}{0,03 - j0,06} = 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & (306 + j147 - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24})(0,01 + j0,02) + \\ & + (201 + j102 - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33})(0,01 + j0,02) + \\ & + (98 + j48 - \underline{S}_{r33})(0,01 + j0,02) - \\ & - (70 + j30 - \underline{S}_{r33})(0,01 + j0,02) + \frac{(10-10) \cdot 10}{0,04 - j0,08} = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & (306 + j147 - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33} - \underline{S}_{r24})(0,01 + j0,02) + \\ & + (201 + j102 - \underline{S}_{r6} - \underline{S}_{r33})(0,01 + j0,02) + \\ & + (103 + j54 - \underline{S}_{r6})(0,01 + j0,02) + \\ & + (78 + j42 - \underline{S}_{r6})(0,01 + j0,02) - \\ & - (45 + j20 - \underline{S}_{r6})(0,01 + j0,02) + \frac{(10-10) \cdot 10}{0,05 - j0,10} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Решив систему уравнений (11)–(13) найдем неизвестные значения мощностей, которые генерируются в схему энергоисточниками потребителей:

$$\underline{S}_{r16} = 87,5 + j44,8 \text{ кВА}; \underline{S}_{r24} = 65,7 + j24,7 \text{ кВА}; \underline{S}_{r33} = 79,8 + j38,2 \text{ кВА}.$$

Зная генерацию энергоисточников в схеме РЛ, потоки мощности по всем ветвям РЛ определим традиционным способом расчета потокораспределения, применяющимся в разомкнутых распределительных электрических сетях энергосистем. Результаты расчета искомого потокораспределения в исследуемой схеме РЛ представлены на рис. 2.

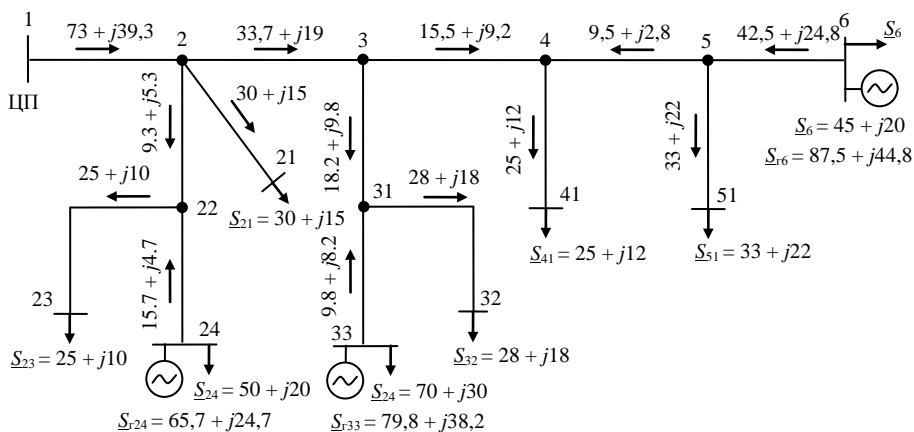


Рис. 2. Схема электрической сети 10 кВ

## ВЫВОДЫ

1. Вопросы расчета и оптимизации режимов все более усложняющихся распределительных электрических сетей 6–10 кВ являются актуальными и требуют постоянного развития и совершенствования.

2. В статье представлен разработанный методический подход для расчета режимов разомкнутых электрических сетей 6–10 кВ, содержащих генерирующие источники, находящиеся на балансе потребителей, работающие параллельно с энергосистемой и оснащенные средствами автоматического регулирования напряжения.

3. Разработанный подход положен в основу развития востребованного в настоящее время комплекса промышленных программ для решения различных технологических задач эксплуатации электрических сетей 6–10 кВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ф у р с а н о в, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 208 с.
2. Ф у р с а н о в, М. И. Программно-вычислительный комплекс GORSR для расчета и оптимизации распределительных (городских) электрических сетей 10(6) кВ / М. И. Фурсанов, А. Н. Муха // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 3. – С. 34–39.
3. Г е р а с и м е н к о, А. А. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Красноярск: НПЦ КГТУ; Минск: БНТУ, 2006. – 808 с.
4. Ф у р с а н о в, М. И. Оценка и анализ режимов и потерь электроэнергии в электрических сетях 6–20 кВ на основе программно-вычислительного комплекса «Дельта» /

М. И. Фурсанов, О. А. Жерко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 1. – С. 31–43.

Представлена кафедрой  
электрических систем  
УДК 621.314

Поступила 05.05.2011

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ АВАРИЙНЫХ ПЕРЕГРУЗОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ**

**Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., инж. АДАМЦЕВИЧ В. А.**

*Белорусский национальный технический университет*

Надежность работы электроэнергетических систем в аварийных условиях зависит, в частности, от выбора допустимой длительности кратковременных аварийных перегрузок турбогенераторов и синхронных компенсаторов, которые позволяют поддерживать уровень напряжения в заданном диапазоне при крупных авариях в энергосистеме. Режимы перегрузок возникают в результате отключения части элементов электроснабжения при проведении их плановых или аварийных ремонтов.

Учет перегрузочной способности генераторов и синхронных компенсаторов в условиях эксплуатации позволяет обеспечить надежное электроснабжение потребителей с наименьшими суммарными затратами на поддержание требуемого качества электроэнергии и наименьшим ущербом от недоотпуска электрической энергии.

**Нормирование кратковременных аварийных перегрузок генераторов.** При эксплуатации синхронных машин существуют нормальные установившиеся режимы, длительно допустимые режимы, отличные от номинальных, а также режимы кратковременных перегрузок синхронных машин в неустановившихся симметричных и несимметричных режимах. В аварийных условиях при перегрузках генераторов и синхронных компенсаторов по токам статора и ротора происходят ускоренный износ изоляции их обмоток и возможна остаточная деформация стержней синхронных машин.

При определении допустимых кратковременных аварийных перегрузок учитываются виды охлаждения электрических машин. Согласно п. 5.1.23 [1] турбогенераторы и синхронные компенсаторы разрешается кратковременно перегружать по токам статора и ротора в соответствии с инструкциями завода-изготовителя, техническими условиями и государственными стандартами. Если же в них необходимые указания отсутствуют, то при авариях в энергосистеме допускается кратковременная перегрузка при указанной в табл. 1 кратности перегрузки по току статора  $K_{\Pi} = I_{\Pi}/I_{\text{ном}}$ , где  $I_{\Pi}$  – ток перегрузки;  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток.

Допустимая перегрузка по току возбуждения турбогенераторов и синхронных компенсаторов с косвенным охлаждением обмоток определяется допустимой перегрузкой статора. Для турбогенераторов с непосредственным водородным или водяным охлаждением обмотки ротора допустимая