

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕНТРАХ ПИТАНИЯ  
НАГРУЗОК

Р. И. БОРИСОВ, В. В. ЛИТВАК

(Представлена кафедрой электрических систем и сетей)

Условия экономической работы электроприемников по напряжению требуют выбора закона регулирования напряжения в центрах питания. В [1] предлагается достаточно простой способ определения целесообразного закона регулирования на основе минимизации ежегодного народнохозяйственного ущерба по напряжению. При этом, однако, не учитываются экономические показатели электрических сетей, которые существенным образом зависят от величины эксплуатационного напряжения.

Предлагается уточнить методику выбора коэффициентов трансформации и установления желаемого закона регулирования напряжения с учетом потерь мощности и энергии в электрических сетях.

Потери активной мощности в продольных элементах, инцидентных узлу  $q$  системы, равны

$$\Delta P_q = 3 \sum_{j=1}^m I_{jq}^2 r_{jq}, \quad (1)$$

где  $j, m$  — номер и число ветвей, присоединенных к узлу  $q$  сети;  $I_j, r_{jq}$  — ток и сопротивление  $j$ -й ветви.

Ежегодные расчетные затраты в энергосистеме, обусловленные потерями активной мощности и электроэнергии в продольных сопротивлениях элементов сети, равны

$$Z = 3 \sum_{t=1}^T (\alpha_M p_2 + \Delta t p_3) \sum_{j=1}^m I_{jq}^2 r_{jq}, \quad (2)$$

$$\alpha_M = \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_{j=1}^m I_{jq}^2 r_{jq} = \max, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Потери электроэнергии здесь определяются по графикам изменения активных и реактивных токов нагрузки. Оператор  $\alpha_M$  вводится для учета стоимости дополнительно установленной мощности на электростанции, необходимой для покрытия максимума потерь активной мощности в сетях.

Для всей сети системы (совокупности  $n$ -узлов и  $m$ -цепей, подключенных к каждому узлу) расчетные затраты равны

$$Z_1 = \frac{3}{2} \sum_{q=0}^n \sum_{t=1}^T (\alpha_M p_2 + \Delta t p_3) \sum_{j=1}^m I_{jq}^2 r_{jq}. \quad (3)$$

Потери в цепи намагничивания силового трансформатора пропорциональны квадрату приложенного напряжения [2]. Значительное перевозбуждение его может приводить к технически недопустимым режимам. Поэтому правила технической эксплуатации [3] регламентируют превышение первичного напряжения трансформатора величиной не более 5% над напряжением, соответствующим данному ответвлению.

Таким образом, потери активной мощности в цепи намагничивания силового трансформатора можно выразить так:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \frac{\Delta P_{xxq}}{U_{\text{отв}}^2} U_q^2. \quad (4)$$

Напряжение ответвления  $U_{\text{отв}}$  целесообразно выразить через искомые величины коэффициентов трансформации  $\kappa_{Tq}$  и желаемые напряжения на вторичной стороне трансформаторов  $U_{\text{ж}q}$ .

$$\Delta P_{\text{ст}} = \kappa_{Tq}^2 \frac{\Delta P_{xxq}}{U_{\text{ж}q}^2} U_q^2. \quad (4')$$

Тогда расчетные затраты в энергосистеме, учитывающие стоимость дополнительно установленной мощности на электростанции, развитие топливной базы и стоимость потерянной электроэнергии в стали трансформаторов, учитывая выражение (1) [1], равны:

$$З = \sum_{q=0}^n \sum_{T} \Delta P_{xxq} \kappa_{Tq}^2 \frac{\beta_{M} p_2 + \Delta t p_3}{U_{\text{ж}q}^2} \left( U_0 - 0,5 \sqrt{3} \sum_{p=1}^n I_{\text{нр}} z_{pq} \right)^2. \quad (5)$$

Таким образом, переменная часть эксплуатационных затрат, зависящая от подведенного к сети напряжения, в системе электроснабжения складывается из ущерба по напряжению (2) [1] и затрат на потери электроэнергии в продольных и поперечных элементах:

$$\begin{aligned} З = З_1 + З_2 + У = \sum_{q=0}^n \sum_{T} \left[ 1,5 (\alpha_{M} p_2 + \Delta t p_3) \sum_{j=1}^m I_{jq}^2 r_{jq} + \right. \\ \left. + \Delta P_{xxq} \kappa_{Tq}^2 \frac{\beta_{M} p_2 + \Delta t p_3}{U_{\text{ж}q}^2} \left( U_0 - 0,866 \sum_{p=1}^n I_{\text{нр}} z_{pq} \right)^2 + \right. \\ \left. + \kappa_{Yq} \frac{\Delta t_*}{U_{\text{ж}q}^2} \left( U_{\text{ж}q} - \kappa_{Tq} U_0 - 0,866 \kappa_{Tq} \sum_{p=1}^n I_{\text{нр}} z_{pq} \right)^2 \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

Минимизация функционала расчетных затрат позволяет установить оптимальные условия регулирования напряжения в распределительных сетях. Метод решения более подробно описан в [1]. Представленные ниже расчетные выражения для определения напряжения в ЦП  $U_0$ , регулируемых  $\kappa_{Tq}$  и нерегулируемых  $\kappa_{Tn}$  коэффициентов трансформации распределительных трансформаторов обеспечивают минимум расчетных затрат:

$$U_0 = \frac{\sum_{q=0}^n \left\{ \frac{\kappa_{Tq}}{U_{\text{ж}q}} \kappa_{Yq} \Delta t_* + 0,866 \frac{\kappa_{Tq}^2}{U_{\text{ж}q}^2} \times \right.}{\sum_{q=0}^n \frac{\kappa_{Tq}^2}{U_{\text{ж}q}^2} [\kappa_{Yq} \Delta t_* + \Delta P_{xxq} (\beta_{M} p_2 + \Delta t p_3)]}$$

$$\times \left[ \kappa_{yq} \Delta t_* + \Delta P_{xxq} (\beta_{mp_2} + \Delta t p_3) \right] \sum_{p=1}^n I_{np} z_{pq} \Bigg\} ; \quad (7)$$

$$\sum_{q=0}^n \frac{\kappa_{Tq}^2}{U_{жq}^2} [\kappa_{yq} \Delta t_* + \Delta P_{xxq} (\beta_{mp_2} + \Delta t p_3)]$$

$$\kappa_{TP} = \frac{\kappa_y \Delta t_* U_{ж}}{\left( U_0 - 0,866 \sum_{p=1}^n I_{np} z_{pq} \right) [\kappa_{yq} \Delta t_* + \Delta P_{xxq} (\beta_{mp_2} + \Delta t p_3)]} ; \quad (8)$$

$$\kappa_{TH} = \frac{\kappa_{yq} \sum_{q=0}^T \frac{\Delta t_*}{U_{жq}} \left( U_0 - 0,866 \sum_{p=1}^n I_{np} z_{pq} \right)}{\sum_{q=0}^T \frac{1}{U_{жq}^2} \left( U_0 - 0,866 \sum_{p=1}^n I_{np} z_{pq} \right)^2 [\kappa_{yq} \Delta t_* + \Delta P_{xxq} (\beta_{mp_2} + \Delta t p_3)]} . \quad (9)$$

Регулирование напряжения в ЦП по форме (7) оказывается невозможным регуляторами обычного типа вследствие необходимости переработки большого объема различной информации. Полученный закон регулирования можно реализовать с помощью специального программного устройства, использующего в качестве аргумента время. Вместе с тем применение такого достаточно сложного и дорогого устройства следует дополнительно обосновать.

В связи с этим представляется целесообразным исследовать условия, в которых использование приближенных, легко реализуемых законов регулирования остается достаточно эффективным.

Исследование условий, в которых наиболее эффективно использование того или иного практического закона регулирования, произведено для схемы электроснабжения, представленной на рис. 1. Узловая подстанция питает две группы потребителей, графики нагрузок которых известны. Централизованное регулирование напряжения осуществляется с помощью РПН понижающего трансформатора. Оптимальный закон регулирования для принятых условий определяется по выражению (7).

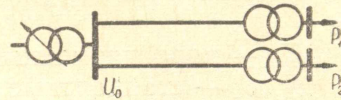


Рис. 1. Схема сети

В качестве приближенных законов регулирования исследованы следующие зависимости:

- 1) стабилизация напряжения в центре питания

$$U_0 = \text{const}; \quad (10)$$

- 2) регулирование напряжения с коррекцией по суммарной активной мощности

$$U_0 = U_{0x} + \kappa_c P_{\Sigma*} . \quad (11)$$

Значения коэффициентов линейной характеристики регулирования  $U_{0x}$ ,  $\kappa_c$  для совокупности  $n$ -режимов определяются по методу наименьших квадратов;

- 3) регулирование напряжения с коррекцией по полному току или полной мощности

$$U_0 = U_{0x} + \kappa_c S_{\Sigma*}; \quad (12)$$

- 4) регулирование напряжения в ЦП осуществляется с целью стабилизации напряжения за некоторыми эквивалентными сопротивлениями (компенсация падения напряжения в эквивалентном сопротивлении)

$$U_0 = U_{0x} + \kappa_c \Delta U_{\Sigma} . \quad (13)$$

В качестве параметра эквивалентного падения напряжения  $\Delta U$ , используется величина  $\Delta U_{cp}$  — среднее падение напряжения от шин ЦП до потребителей 1 и 2.

Так как вместо оптимального (7) реализуется некоторый приближенный закон регулирования напряжения в ЦП, то в системе электро-снабжения имеют место определенные расчетные затраты, по величине которых можно судить об эффективности того или иного закона регулирования и обоснованно его принять или отвергнуть. Исследование целесообразности названных законов регулирования  $U_0$  проведено в условиях, когда графики нагрузок потребителей близки к однородным. Степень неоднородности выражается параметрами взаимной корреляционной связи потребляемых мощностей нагрузок [4] и характеризуется коэффициентом линейной корреляции  $r_{12}$  [5]:

$$r_{12} = \frac{K_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \quad (14)$$

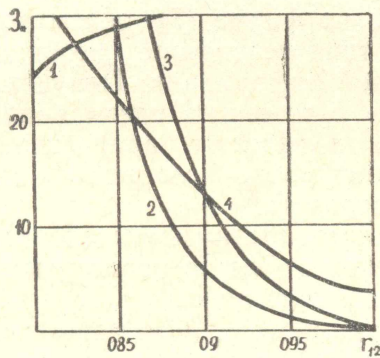


Рис. 2

где

$K_{12}$  — корреляционный момент,  
 $\sigma_1, \sigma_2$  — стандартные отклонения случайных величин.

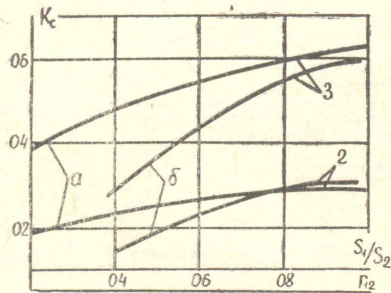


Рис. 4. Крутизна характеристики встречного регулирования в зависимости от соотношения мощностей потребителей (а) и коэффициента корреляции нагрузок (б)

строены при соотношении мощностей первого и второго потребителей, равном 0,666.

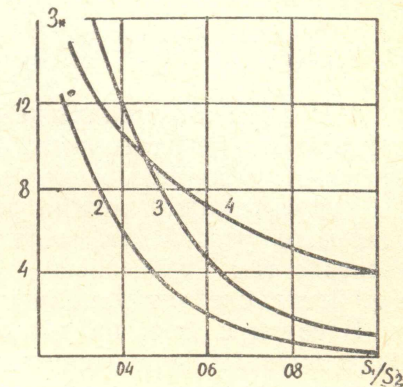


Рис. 3. Зависимости затрат в функции от соотношения нагрузок потребителей  $S_1/S_2$  при среднем значении коэффициента корреляции, равном 0,95

Исследование эффективности практических законов регулирования напряжения в ЦП проведено в следующих условиях. Графики нагрузок первого и второго потребителей соответствуют действительным графикам нагрузок двух различных по характеру производственного процесса цехов машиностроительного завода ( $r_{12} = 0,6 + 1,0$ ). Суммарная максимальная мощность потребителей составляет 10 мва ( $S_1 = 5-8, S_2 = 5-1,6$ ). Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 2, 3, 4. На рис. 2 показаны зависимости расчетных затрат (б) от коэффициента корреляции нагрузок при различных законах регулирования напряжения в ЦП. Зависимости по-

## Выводы

1. В силу трудностей реализации точного закона регулирования напряжения в ЦП проведены исследования по установлению экономических интервалов, в которых целесообразно применение рассмотренных законов регулирования. Показано, что стабилизация напряжения экономически целесообразна при питании неоднородных потребителей, когда коэффициент корреляции меньше 0,7.

2. В системе однородных потребителей (коэффициент корреляции больше 0,85) при любом соотношении мощностей потребителей регулирование напряжения следует производить по изменению величины напряжения с корреляцией по суммарной активной мощности.

3. Крутизна характеристики встречного регулирования зависит от соотношения мощностей потребителей и степени их однородности и находится в пределах: 0,15—0,3 — при регулировании по активной мощности, 0,3—0,6 — по полной суммарной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. Борисов, В. В. Литвак, В. Д. Козырев. Совместный выбор коэффициентов трансформации и условий централизованного регулирования напряжения в распределительных сетях. Изв. вузов. «Энергетика», 12, 1968.
  2. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. «Энергия», М., 1964.
  3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. «Энергия», М., 1965.
  4. Н. И. Билик. Неодинаковость напряжения и статистические числовые характеристики нагрузок электрических сетей. «Электричество», № 8, 1964.
-