Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XXXIУ, 1979 г.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С КОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

О.В.ИВАНОВ, Е.М.ПРОСКУРЯКОВ,
Л.Н.СМИРНОВА

Распределительная сеть калийных рудников характеризуется большой протяженностью и энергоемкостью. Поэтому величина напряжения на отдаленных участках сети часто достигает недопустимых по ГОСТу значений. Для компенсации потерь напряжения в распределительных сетях калийных рудников можно использовать следующие устройства [1]: вольтодобавочные трансформаторы ВДТ [2]; последовательные конденсаторы ПК ; параллельные источники реактивной мощности - параллельные конденсаторы и регулируемые источники реактивной мощности.

Проведен сравнительный анализ регуляторов напряжения с точки зрения степени компенсации потерь напряжения в различных режимах распределительной сети калийных рудников (рис.I). Проанализируем работу ВДТ в распределительной сети, обратив особое внимание на место включения ВДТ (начало или конец линии). Рассмотрим ВДТ с продольным регулированием напряжения, включаемого в радиальную линию. Схема замещения такого ВДТ, включенного вначале линии, представлена на рис.I,а.

Установившийся режим такой цепи описывается системой уравнений

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 , \qquad \dot{U}_{20} = Z_1 \dot{I}_2 ,$$

$$\dot{U}_1 = Z_1 \dot{I}_1 - Z_M \dot{I}_2 , \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_2 Y_П , \quad Y_П = \frac{1}{Z_П} , \qquad (I)$$

$$\dot{U}_1 = - Z_M \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_{20} .$$

Полагая, что

$$\frac{Z_M}{Z_{1T}} = \frac{1}{k_T} \quad и \quad \frac{Z_M}{Z_{2T}} = k_T , \qquad (2)$$

запишем значения комплексных сопротивлений короткого замыкания ВДТ, приведенные к стороне первичного Z_{k1} и вторичного Z_{k2} напряжения,

$$Z_{k1} = Z_{1T} - \frac{Z_M^2}{Z_{2T}} ; \quad Z_2 = Z_{2T} - \frac{Z_M^2}{Z_{1T}} .$$

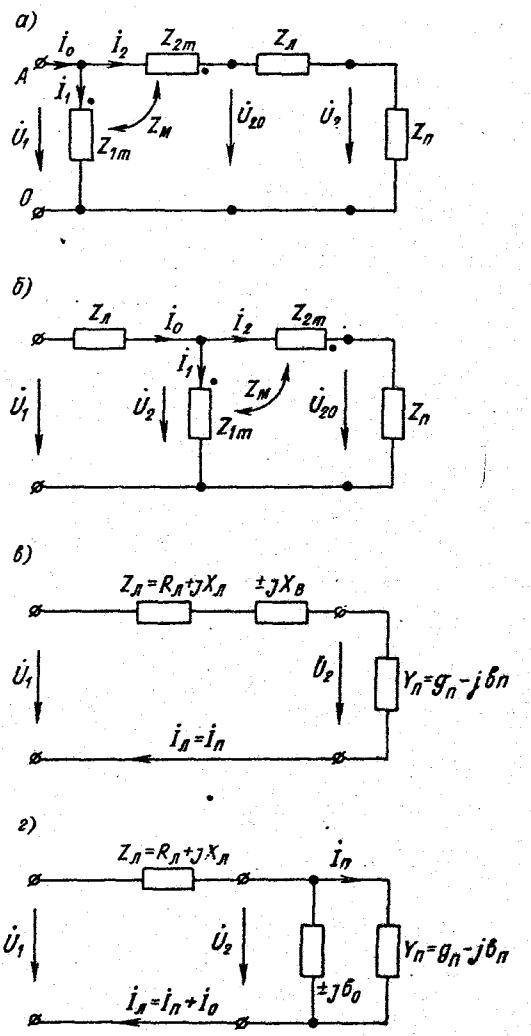


Рис.1. Схема одной фазы радиальной линии:
а – с ВДТ в начале линии; б – с ВДТ в конце линии;
в – с реактивной вставкой; г – с реактивным ответвлением

Проделав несложные преобразования, получим модули напряжений на нагрузке при включенном U_2 и выключенном ВДТ U_2'

$$U_2 = \alpha U_2', \qquad U_2' = U_1 \frac{1}{\sqrt{(\cos\varphi_п + R_л y_п)^2 + (\sin\varphi_п + X_л y_п)^2}}, \qquad (3)$$

где $\alpha = 1 + \frac{1}{k_т}$; $\varphi_п$ – сдвиг фаз между напряжением и током нагрузки.

Тогда добавка напряжения на нагрузке, получаемая за счет включения ВДТ в начале линии, $\delta U_т = U_2 - U_2'$. При включении ВДТ в конце питан-

щей линии уравнения расчетной схемы (рис.I,б) имеют вид

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_0 Z_л , \qquad \dot{U}_2 = \dot{U}_{20} + \dot{I}_2 Z_{2т} - \dot{I}_1 Z_м ,$$
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 , \qquad \dot{I}_2 = \dot{U}_{20} Y_п . \tag{4}$$

Откуда модуль напряжения на нагрузке

$$U_{20} = U_1 \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1}{\alpha} + \alpha y_п z_л \cos(\varphi_л - \varphi_п)\right]^2 + \left[\alpha y_п z_л \sin(\varphi_л - \varphi_п)\right]^2}} , \tag{5}$$

где $\varphi_л$ – сдвиг фаз между напряжением и током линии.

При отсутствии ВДТ (когда $\alpha = I$) выражение для определения модуля напряжения на нагрузке примет вид

$$U_2' = U_1 \frac{1}{\sqrt{\left[1 + y_п z_л \cos(\varphi_л - \varphi_п)\right]^2 + \left[y_п z_л \sin(\varphi_л - \varphi_п)\right]^2}} \tag{6}$$

и приращение напряжения

$$\delta U_т = U_{20} - U_2' .$$

Для оценки возможности регулирования напряжения с помощью нерегулируемого ВДТ, включаемого в начале и конце питающей линии, проведены расчеты на примере двух питающих линий – ТП–ЦПП ($\frac{X_л}{R_л} = I0$) и ТП–ГУ ($\frac{X_л}{R_л} = 0{,}33$). Расчет выполнен в относительных единицах. В результате расчета построены зависимости $U_2^* = f(y_п^*)$ и $\delta U_т^* = f(y_п^*)$.

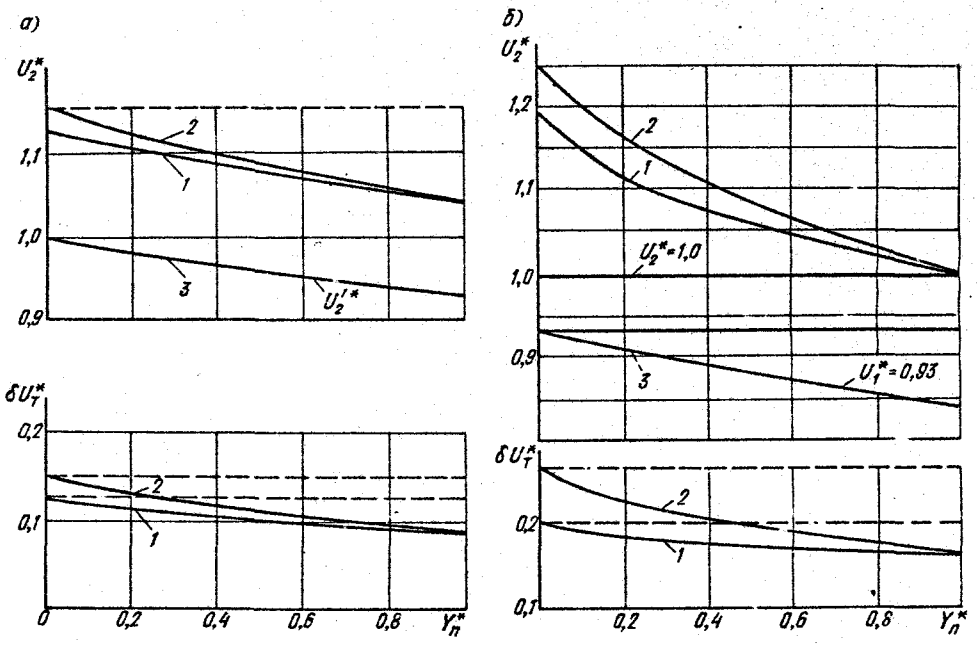


Рис.2. Зависимость напряжения U_2^* и изменения напряжения $\delta U_т$ в начале (а) и конце (б) линии:
1 – ВДТ в начале линии; 2 – ВДТ– в конце линии; 3 – без БДТ

При расчетах принято напряжение в начале линии $U_1^* = 1{,}0$, в конце линии с включенным ВДТ $U_2^* = 1{,}05$. Как видно из рис.2,а,б, при изменении нагрузки $y_п^*$ в пределах от 0 до 1,0 добавка напряжения $\delta U_т^*$ изменяется от 0,12 до 0,129 при включении ВДТ в начале линии и от 0,12 до 0,155 в конце линии. Коэффициент трансформации, требуемый из условия обеспечения $U_2^* = 1{,}05$, при максимальной нагрузке и включении ВДТ в конце линии $k_т = 6{,}45$, при включении в начале линии $k_т = 7{,}75$.

Установленная мощность ВДТ определяется величиной $k_т$. При включении ВДТ в конце линии мощность трансформатора и соответственно потери существенно больше, чем при включении в начале линии. Таким образом, вариант включения ВДТ в начале линии предпочтительнее.

На рис.1,в показана схема радиальной линии при включенных последовательных конденсаторах (реактивная вставка). Система уравнений, описывающая установившийся режим такой цепи, будет

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_л\left(R_п + jX_п\right) = \frac{1}{g_п + jb_п}\dot{I}_л\ ; \qquad \dot{U}_1 = \dot{I}_л\left[R_п + R_л + j\left(X_п + X_л \mp X_в\right)\right]. \tag{7}$$

Решение ее позволяет получить выражение для величины сопротивления реактивной вставки при заданном отношении $k = \frac{U_1}{U_2}$

$$X_в = \pm\left(X_п + X_л\right) + \sqrt{k^2 Z_п^2 - \left(R_п - R_л\right)^2}. \tag{8}$$

При этом

$$\delta U_в = \frac{1}{\sqrt{\left(\cos\varphi_п + R_л y_п\right)^2 + \sin^2\varphi_п}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\cos\varphi_п + R_л y_п\right)^2 + \left(\sin\varphi_п + X_л y_п\right)^2}} \tag{9}$$

Так как для реализации $X_в$ существует ограничение $k \geq \frac{R_п + R_л}{Z_п}$ (по уравнению (8)), то предельное значение

$$\delta U_{в\,пред} = \frac{1}{\cos\varphi_п + R_л y_п} - \frac{1}{\sqrt{\left(\cos\varphi_п + R_л y_п\right)^2 + \left(\sin\varphi_п + X_л y_п\right)^2}}. \tag{10}$$

Как известно из опыта эксплуатации ПК [3], в линиях, имеющих двигательную нагрузку, величина реактивного сопротивления вставки не должна превышать удвоенного значения реактивного сопротивления линии, т.е. $X_в \leqslant 2X_л$. Тогда значение модуля напряжения

$$\delta U_{в\,max} = U_1\left[\frac{1}{\sqrt{\left(\cos\varphi_п + R_л y_п\right)^2 + \left(\sin\varphi_л - X_л y_п\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\cos\varphi_п + R_л y_п\right)^2 + \left(\sin\varphi_п + X_л y_п\right)^2}}\right]. \tag{11}$$

Для оценки максимально допустимых величин $\delta U_в$ рассчитаны линии с нерегулируемой емкостной реактивной вставкой и переменной нагрузкой. Рассчитанные величины выражены в относительных единицах. Напряжение в начале линии считалось постоянным и равным $U_1^* = 1$.

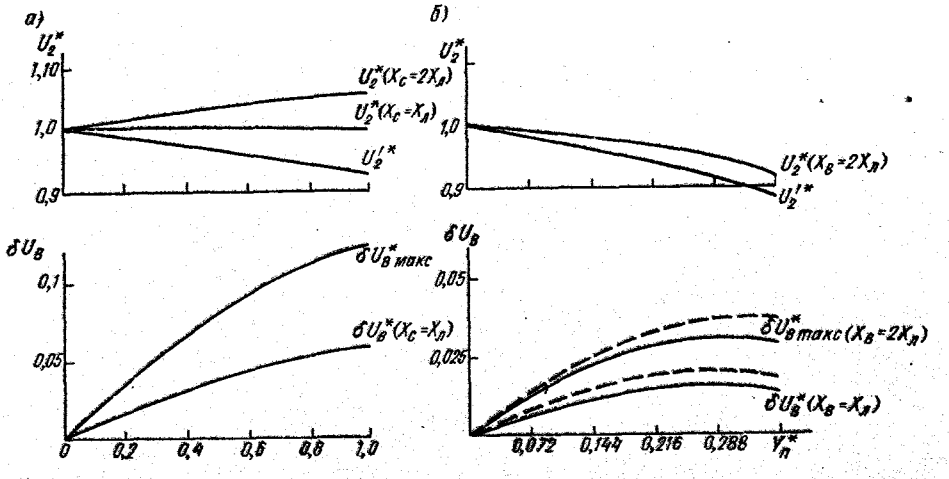


Рис.3. Зависимость напряжения U_2^* и изменения напряжения δU_0 при включении реактивной вставки

а – $\frac{X_Л^*}{R_Л^*} = 10$ – линия ЦПП–ТП; б – $\frac{X_Л^*}{R_Л^*} = 0{,}33$ – линия ТП–ГУ–2

Пунктирные кривые рассчитаны по приближенным формулам системы (7) при $Y_Л = 0$

Как следует из рис.3, в линиях с относительно большим отношением $\frac{X_Л}{R_Л}$ нерегулируемая емкостная вставка позволяет получить напряжения $\delta U_{B\,max}$ при допустимом значении X_B, превышающие величину потери напряжения в рассматриваемой линии почти вдвое. Если величина реактивного сопротивления вставки ограничена условием $X_B = X_Л$, то и в этом случае величина добавки напряжения $\delta U_B = 6\%$, т.е. почти полностью компенсирует потерю напряжения в линии. В линиях с малым отношением $\frac{X_Л}{R_Л}$ емкостная вставка дает значительно меньшие добавки напряжения $\delta U_{B\,max}$ при тех же ограничениях X_B.

Как следует из графиков, в линиях с относительно большим отношением $\frac{X_Л}{R_Л}$ приближенные значения δU_B мало отличаются от точных. В линиях с малым отношением $\frac{X_Л}{R_Л}$ приближенные значения δU_B существенно отличаются от точных.

При включении параллельных источников реактивной мощности схему радиальной линии можно представить подобной рис.1,г. Система уравнений, описывающих установившийся режим такой цепи, будет

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{I}_Л}{g_П \pm j(b_0 \mp b_П)}, \quad \dot{U}_1 = \dot{I}_Л \frac{[g_П + g_Л \pm j(b_П + b_Л)]}{(g_Л - j\,b_Л)[g_П \pm j(b_0 \mp b_П)]}. \qquad (12)$$

Верхние знаки в этом выражении соответствуют емкостному ответвлению, нижние – индуктивному. Решение системы дает зависимость для определения величины проводимости реактивного ответвления при заданном отношении $\frac{X_Л}{R_Л}$

$$b_0 = \pm (b_П + b_Л) \mp \sqrt{k^2 y_Л^2 - (g_П + g_Л)^2}. \qquad (13)$$

117832

При этом значении добавка напряжения при неизменном напряжении U_1 :

$$\delta U_0 = U_1 \left\{ \frac{1}{\sqrt{(z_л g_п + \cos\varphi_л)^2 + [z_л(b_0 \mp b_п) \mp \sin\varphi_л]^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z_л g_п + \cos\varphi_л)^2 + (z_л b_п + \sin\varphi_л)^2}} \right\} \cdot \quad (14)$$

Так как для реализации уравнения (13) существует ограничение $k \geq \frac{g_п + g_л}{y_л}$, то

$$\delta U_{0пред} = U_1 \left[\frac{1}{z_л g_п + \cos\varphi_л} - \frac{1}{\sqrt{(z_л g_п + \cos\varphi_л)^2 + (z_л b_п + \sin\varphi_л)^2}} \right].$$

Максимальные значения добавки напряжения ограничиваются допустимыми токовыми нагрузками линий и допустимой величиной гарантируемой реактивной мощности, т.е. $b_{ос} \leqslant 2 b_п$.

Тогда

$$\delta U_{0max_1} = U_1 \left[\frac{1}{\sqrt{(z_л g_п + \cos\varphi_л)^2 + (\sin\varphi_л - z_л b_п)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z_л b_п + \cos\varphi_л)^2 + (z_л b_п + \sin\varphi_л)^2}} \right],$$

$$\delta U_{0max_2} = U_1 \left[\frac{1}{\sqrt{(z_л g_п + \cos\varphi_л)^2 + \sin^2\varphi_л}} - \frac{1}{\sqrt{(z_л b_п + \cos\varphi_л)^2 + (z_л b_п + \sin\varphi_л)^2}} \right].$$

Для оценки максимально допустимых величин δU_0 рассчитаны линии с регулируемыми и нерегулируемыми реактивным емкостным ответвлением и пе-

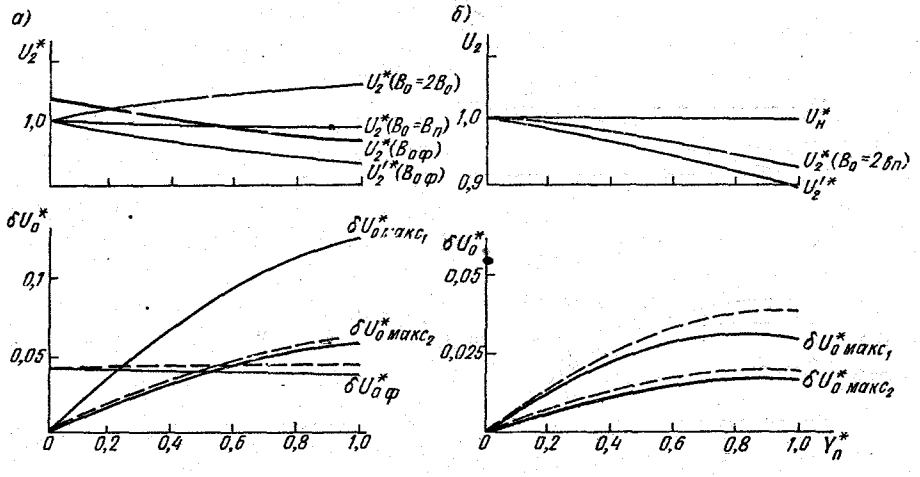


Рис.4. Зависимость напряжения δU_0 и изменения напряжения при включении реактивного ответвления
а – $\frac{X_л^*}{R_л^*} = 10$ – линия ЦПП–ТП; б – $\frac{X_л^*}{R_л^*} = 0{,}33$ – линия ТП–ГУ–2

ременной нагрузкой. Расчеты велись в относительных единицах. В начале линии принято $U_1^* = 1$. Относительные величины отмечены звездочкой. Как следует из рис.4, регулируемое емкостное ответвление создает во всех режимах нагрузки такие же максимальные добавки напряжения, как и нерегулируемая емкостная вставка, т.е.

$$\delta U_{0max_1} \approx \delta U_{в max},$$

$$\delta U_{0max_2} \approx \delta U_{в(x_в = x_л)}.$$

Таким образом, реактивное емкостное ответвление, регулируемое так, чтобы $b_0 = 2b_п$ (или $b_0 = b_п$), практически эквивалентно в отношении ограничений регулирования напряжения нерегулируемой емкостной вставке с $X_в = 2X_л$ (или $X_в = X_л$). Существенно различаются лишь предельные величины добавок $\delta U_{0пред}$ и $\delta U_{впред}$, причем, как видно из рис.3 и 4, в рассматриваемых случаях $\delta U_{0пред} > \delta U_{впред}$ при $\frac{X_л^*}{R_л^*} = 10$ и $\delta U_{впред} > \delta U_{0пред}$ при $\frac{X_л^*}{R_л^*} = 0{,}33$. В случае нерегулируемого ответвления величина добавки δU_0 при изменении нагрузки меняется мало и согласно с изменением уровня U_2. Как следствие этого, в режимах малых нагрузок имеет место перекомпенсация, а в режиме больших – недокомпенсация потерь напряжения. В связи с этим нерегулируемое емкостное ответвление не может рассматриваться, как эффективное средство регулирования напряжения.

Полученные соотношения позволяют рассчитать режимы работы сетей с различными регуляторами, оценить возможность повышения напряжения для каждого из методов регулирования, получить предельные значения допустимых надбавок напряжения в различных режимах работы сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в городских сетях. М., Энергия, 1967.

2. Белоусов В.С., Золотарева О.Н. Вольтодобавочный симметрирующий трансформатор. – Изв. вузов, Энергетика, 1972, № 8.

3. Побуль Г.Х., Романов А.Д. Опыт применения установок продольно-емкостной компенсации для увеличения пропускной способности высоковольтных распределительных сетей. – Электрические станции, 1972, № 5.