УДК 622:621.316.72:621.3

М.М.ВОЛОШКИН
Горно-электромеханический факультет,
студент группы ЭР–97, ассистент профессора

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

В условиях роста цен на электрическую энергию особое значение приобретает совершенствование режимов потребления. Анализ использования технических средств показал, что групповое регулирование напряжения в сетях горных предприятий осуществляется в основном с помощью механических устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) – силовых трансформаторов мощностью выше 1 МВ·А.

Среди множества способов улучшения режимов потребления особое место занимает регулирование режима напряжения, так как позволяет снизить энергетическую составляющую на 10-15 %, поддерживать устойчивость работы электрического оборудования и увеличить срок его службы.

В статье рассмотрена конструкция устройств РПН. Показана методика выбора уставок срабатывания РПН для предприятий, где имеются электроприемники, электроснабжение которых осуществляется по протяженным линиям, а также электроприемники, работающие в тяжелых нагрузочных условиях (угольные и сланцевые шахты, угольные и рудные карьеры и т.д.).

Приведена методика расчета, позволяющая определить экономический эффект, получаемый при введении РПН и построена целевая функция экономической эффективности регулирования, наглядно демонстрирующая преимущества применения таких устройств.

With the electric power price raising, it is more and more important to improve the conditions of consumption. The analysis of mechanical facilities use has shown the group voltage control in the network of mining companies to be carried out basically through mechanical devices of voltage control under load (VCUL), viz. by power transformers, their power being over 1 MW·A.

Among the multitude of the ways of improving the conditions of consumption of special interest should be voltage control conditions, the latter favouring a 10-15 % decrease of the power component, the maintenance of the electric equipment operation stability as well as the augmentation of service life.

The paper considers the design of the VCUL devices. The methods of selection of units of VCUL operation for the companies, that have loads, using equipment, the power supply of which is conducted along extensive lines, and electric power receivers, that operate under heavy load conditions (collieries, shale mines, opencast collieries, quarries, ect.), have been introduced herein.

The paper also shows the analysis procedure, that makes it possible to determine the economic efficiency as a result of the VCUL introduction. There has been constructed the efficiency function of the economic effectiveness of control, showing evidently the advantages of use of the devices involved.

Анализ использования технических средств для группового регулирования напряжения в сетях горных предприятий показал, что в настоящее время регулирование осуществляется в основном с помощью механических устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) силовых трансформаторов мощностью выше 1 МВ·А.

Из-за наличия регулятора коэффициента трансформации под нагрузкой такие трансформаторы представляют в виде устройств с переменным коэффициентом трансформации:

$$K_т = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}, \qquad (1)$$

где W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмотки трансформатора Т; U_1 и U_2 – напряжение на первичной и вторичной стороне силового трансформатора питающей подстанции.

Общим для всех устройств РПН является разрыв электрической цепи контактором, этот признак – основной классификационный. Наиболее широко используются резисторные переключающие устройства, применение уве-

личенного числа резисторов и дугогасительных контактов в одном устройстве позволяет распределить коммутируемую мощность между отдельными параллельными контактами и обеспечить более надежную работу переключающих устройств.

Устройства РПН рассматриваются как самостоятельные электрические аппараты и разделяются на следующие конструктивные узлы:

1) контактор, предназначенный для переключения ступени, а также токоограничения и гашения дуги при коммутации;

2) избиратель, предназначенный для выбора рабочего отвода регулировочной обмотки трансформатора;

3) предизбиратель (при большом числе ступеней), конструктивно соединенный с избирателем и предназначенный для переключения диапазонов регулирования путем выбора рабочего отвода специальной обмотки грубого регулирования или реверсирования обмотки регулирования.

Для резисторных устройств РПН наиболее распространена погружная конструкция, в которой контактор и избиратель выполнены в одном блоке.

Резисторные устройства РПН имеют меньшие вес и габариты по сравнению с реакторными, однако кинематика резисторных устройств более сложна, так как токоограничивающий резистор не может быть длительное время включен в цепь тока нагрузки трансформатора в рабочем или промежуточном положении из-за больших потерь. Резистор используется только для кратковременного включения в цепь тока нагрузки в промежуточных положениях, а в рабочем положении шунтируется или размыкается. Поэтому применение резисторного контактора требует применения быстродействующего приводного механизма. Главное преимущество резисторных контакторов, по сравнению с реакторными, состоит в том, что гашение дуги, возникающей в контакторе при переключении регулировочной обмотки, существенно более легкое.

Срок службы контактов устройств РПН с разрывом дуги в масле и многоконтактным резисторным контактором достигает 500 тыс. переключений при токе нагрузки не более 700 А, при токе нагрузки 1600 А срок службы контактов снижается до 150 тыс. переключений, так как зависимость электроизноса контактов от тока нагрузки близка к квадратичной.

Одним из более совершенных способов коммутации является гашение дуги в вакууме. В последнее время вакуумные контакторы устройств РПН получили широкое распространение во всем мире. Основными преимуществами вакуумных контакторов являются отсутствие открытой дуги и необходимости замены масла, меньшие габариты и более высокая коммутационная способность. Недостатком таких контакторов являются коммутационные перенапряжения. Износостойкость лучших образцов вакуумных контакторов на номинальные напряжения 3,6-7,2 кВ и номинальные токи 200-400 А достигает 1 млн переключений.

Выбор нижней уставки срабатывания РПН влияет на устойчивость работы электродвигателей и особенно важен для предприятий, где имеются электроприемники, электроснабжение которых осуществляется по протяженным линиям, а также электроприемники, работающие в тяжелых нагрузочных условиях (угольные и сланцевые шахты, угольные и рудные карьеры и т.д.).

Как показали исследования, минимум регулировочных характеристик нагрузки по напряжению $P = f(U)$ и $Q = f(U)$ находится в пределах (0,75-0,85) $U_н$. Поэтому для снижения потребления активной и реактивной мощности напряжение на шинах понизительных подстанций предприятия следует поддерживать близким к нижнему пределу, обусловленному устойчивостью работы наиболее удаленных от шин подстанций электроприемников (не оборудованных индивидуальными устройствами регулирования напряжения), с учетом компенсации потерь в питающих линиях.

При коррекции нижней уставки по току целесообразно контролировать не менее двух линий с наибольшими потерями, так как отключение одной линии ($I_{нг} = 0$) может привести к снижению напряжения на шинах

подстанции ниже минимально допустимого уровня и снижению уровня напряжения на электроприемниках ниже уровня, обеспечивающего их устойчивую работу. Поэтому микропроцессор должен определить линию с наибольшими потерями и рассчитать нижнюю уставку РПН, ориентируясь на эту линию:

$$U_{\text{уст.н}} = U_{\min.\text{доп}} + \text{MAX}\{I_{\text{нелi}}(R_{\text{лi}}\cos\varphi_{\text{лi}} + X_{\text{лi}}\sin\varphi_i)\}, \quad (2)$$

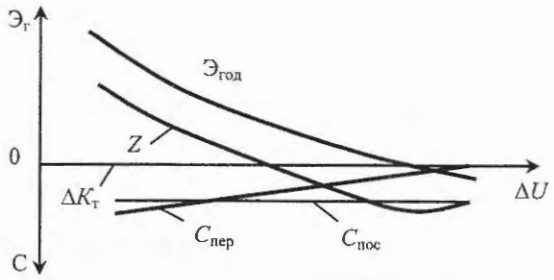
где $I_{\text{нелi}}$ – ток нагрузки i-й линии в часы максимума; $R_{\text{лi}}$ и $X_{\text{лi}}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление i-й линии.

При регулировании напряжения на ГПП необходимо обеспечить баланс между снижением суточного числа переключений (зависящего от ширины зоны нечувствительности), увеличением срока службы контактов до нескольких лет и достижением экономического эффекта от процесса регулирования напряжения. Широкая зона нечувствительности является причиной повышенного потребления электроэнергии при работе на повышенном напряжении.

Проблему нахождения верхней уставки срабатывания устройств РПН, при которой процесс регулирования будет экономически выгодным, можно решить построив целевую функцию экономической эффективности регулирования напряжения на шинах понизительной подстанции в зависимости от ширины зоны нечувствительности $Z = f(\Delta U)$:

$$Z = Э_{\text{г}} - C_{\text{пер}} - C_{\text{пост}} - K_{\text{год}}; \quad (3)$$

$$Z = (P_0(a_1(U_{\text{ср.нер}} - U_{\text{ср.рег}}) - a_2(U^2_{\text{ср.нер}} - U^2_{\text{ср.рег}}))T_{\text{сут}} + \Delta W_{\text{пот}})365C_{\text{э}} +$$



Целевая функция экономической эффективности регулирования

$$+\left\{P_0\left[a_1(U_{\max} - U_{\text{у.в}}) + a_2(U^2_{\max} - U^2_{\text{у.в}})\right] + Q_0^2 R_{\text{э}}\left(\frac{b_0}{U^2_{\max}} - \frac{b_0}{U^2_{\text{у.в}}} + \frac{b_1}{U_{\max}} - \frac{b_1}{U^2_{\text{у.в}}}\right)\right\}C_{\text{зм}} - \frac{C_{\text{к}} + (\omega_{\text{с}}\tau_{\text{с}}У - \nu_{\text{с}}\eta_{\text{с}}У_2)_1\frac{P_{\text{м}}}{K_{\text{м}}}}{T_{\text{к}}} - K_{\text{год}}, \quad (4)$$

где $Э_{\text{г}}$ – годовая экономия от снижения потребления электроэнергии при внедрении автоматического регулирования режима напряжения на шинах понизительной подстанции (см. рисунок); $C_{\text{пер}}$ – годовые текущие затраты, зависящие от ширины зоны нечувствительности; $C_{\text{пост}}$ – годовые текущие затраты, не зависящие от ширины зоны нечувствительности; $K_{\text{год}}$ – капитальные затраты на аппаратуру автоматического управления устройствам РПН, приведенные к одному году.

Определив нижнюю уставку срабатывания РПН и задаваясь различными значениями ширины зоны нечувствительности ΔU, можно найти область значений верхней уставки, при которой регулирование режима напряжения с помощью устройства РПН силового трансформатора экономически выгодно.

Научный руководитель профессор, д.т.н. *Б.Н.Абрамович*