



УДК 622.619-695

**С.В. Коротеев**

Зыряновский центр ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Зыряновск

#### МНОГОЭТАПНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Среди функций системы управления распределение ресурсов является едва ли самой главной. От правильности распределения имеющихся ресурсов между направлениями (цехами, участками, видами технологий и т.д.) зависит величина доходов предприятия в дальнейшем. И наиболее сложным является верное решение по распределению средств в условиях их дефицита. Это связано с тем, что в условиях недостаточного финансирования объекты управляемой системы не могут находиться в оптимальных для них состояниях. А так как не все объекты управляемой системы будут находиться в оптимальном состоянии, то и вся система будет находиться в состоянии, отличном от оптимального.

Состояние каждого из объектов системы характеризуется множеством параметров, критериев, показателей. Путем агрегирования частных показателей специалисты (эксперты) могут получить личные экспертные оценки. На основе экспертных оценок ЛПР (лицо, принимающее решение) может получить оценки состояния каждого объекта управляемой системы.

Состояние системы в целом определяется состояниями ее объектов. Но так как при недостатке ресурсов достижение оптимального состояния системы не возможно, то ЛПР должно определить такое распределение ресурсов, когда система в целом находится в лучшем, с точки зрения некоторой политики распределения, ресурсов состоянии.

В классической экономике существует несколько подходов к распределению ресурсов [1]. Наиболее известными являются классический эгалитаризм и классический утилитаризм. На практике применяются также и другие подходы к распределению ресурсов между направлениями: политика гарантированного минимума, политика латания дыр, политика пропорционального распределения, политика равномерной ликвидации диспропорций и другие. От выбора политики зависит, какое распределение ресурсов следует считать наилучшим в условиях дефицита средств.

Рассмотрим механизм распределения ресурсов государственного предприятия (ГП) «Теплоцентральный». Предприятию принадлежат коммуникации, находящиеся вне строений. А трубы и радиаторные батареи, находящиеся внутри строений, принадлежат собственникам жилья (или организациям).

Основная часть коммуникаций была запущена в строй одновременно с соответствующими жилыми массивами и из-за длительного использования нуждается в ремонте или замене. Имеющиеся у предприятия средства не позволяют произвести замену всех коммуникаций в ближайшее время. Но утечка горячей воды и снижение ее температуры из-за ветхости коммуникаций также наносит предприятию ущерб. Таким образом, перед предприятием стоит задача распределения имеющихся ресурсов (финансов, труб, трудовых ресурсов) некоторым наилучшим образом. Это наилучшее распределение должно удовлетворять следующим правилам:

1. Все имеющиеся коммуникации должны функционировать. То есть, невзирая на де-

фицит средств у ГП «Теплоцентральный», каждый абонент, своевременно оплачивающий оказываемые услуги, должен и впредь получать услуги в полном объеме. Для этого предприятие должно производить, по меньшей мере, текущий ремонт коммуникаций до обеспечения состояния гарантированного минимума.

2. Средства предприятия, выделенные на ремонтные работы на планируемый период, оставшиеся после проведения текущего ремонта, должны вкладываться в капитальный ремонт наиболее ветхих участков коммуникаций.

Таким образом, предприятие вынуждено комбинировать классическую утилитарную политику с политикой гарантированного минимума.

При оценке состояния каждого из участков коммуникаций используются следующие частные критерии: количество заявок на проведение текущего ремонта (в течение предыдущего периода); потери горячей воды из-за утечки (как соотношение между объемом отпущенной на участок воды и ее объемом, полученной объектами, оборудованными счетчиками); потери тепла вследствие снижения температуры воды; другие критерии, используемые индивидуальным экспертом. Состояние  $i$ -го участка теплотрассы  $j$ -м экспертом оценивается по мультипликативной схеме:

$$y_{ij} = \begin{cases} \prod_{k=1}^{k_j} \frac{y_{ijk}}{\underline{y}_{ijk}} & , \text{ если } y_{ijk} \geq \underline{y}_{ijk} \quad (k = \overline{1, k_j}) \\ 0 & , \text{ в противном случае} \end{cases}$$

где  $k_j$  - количество критериев, являющихся важными для  $j$ -го эксперта;

$y_{ijk}$  - оценка  $k$ -го частного критерия  $i$ -го участка  $j$ -м экспертом;

$\underline{y}_{ijk}$  - минимально допустимое значение  $k$ -го частного критерия  $i$ -го участка теплотрассы  $j$ -м экспертом;

$\bar{y}_{ijk}$  - эталонное значение  $k$ -го частного критерия  $i$ -го участка теплотрассы  $j$ -м экспертом;

$\lambda_{jk}$  - весовой коэффициент  $k$ -го частного критерия для  $j$ -го эксперта.

На основании представленных экспертами оценок можно получить оценку состояния  $i$ -го участка теплоцентрали:

$$y_i = \sum_{j=1}^k \lambda_j \cdot y_{ij}$$

где  $k$  - количество экспертов, привлеченных к анализу состояния теплотрассы;

$\lambda_j$  - значимость (весовой коэффициент) оценки  $i$ -го эксперта.

Будем считать, что улучшение состояния любого участка теплотрассы пропорционально вложению ресурсов в этот участок, а ухудшение его состояния связано с амортизацией и носит случайный характер.

Детерминированная модель распределения ресурсов при среднесрочном планировании имеет вид [2]:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{y}_i - y_i(t)}{\bar{y}_i} \right) \rightarrow \min;$$

$$\sum_{i=1}^n u_i(t) \leq c(t) = \varphi(t) + \psi(t);$$

$$y_i(t) = y_i(t-1) + S_i(t)u_i(t) + d_i(t);$$

$$y_i(1) > 0, \quad y_i(t) \geq y_i(t-1), \quad S_i(t) \geq 0, \quad c(t) > 0, \quad u_i(t) \geq 0;$$

$$0 < P_i(t) = y_i(t+1) \leq \bar{y}_i; \quad P_i(t) \geq P_i(t-1); \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad t \in [1, T],$$

где  $t \in [1, T]$  – периоды принятия решения по распределению ресурсов;

$c(t) = \varphi(t) + \psi(t)$  – определенное количество ресурсов, причем

$\varphi(t)$  – ресурсы, подлежащие распределению в данный момент времени  $t$ ,

$\psi(t)$  – ресурсы, направляемые в резерв в виде накопительного или резервного фонда предприятия. Средства, находящиеся в резервном фонде предприятия, могут быть использованы в любой момент времени  $\tau \in [1, T]$ ;

$n$  – количество возможных направлений вложения и использования имеющихся ресурсов, т.е. количество участков коммуникаций;

$i = 1, 2, \dots, n$  – порядковые номера участков коммуникаций;

$u_i(t)$  – количество ресурсов, вложенных в  $i$ -й участок в момент времени  $t$ ;

$y_i(t)$  – состояние  $i$ -го участка в момент времени  $t$ ;

$\bar{y}_i$  – эталонное состояние  $i$ -го участка в момент времени  $T$ ;

$P_i(t)$  – состояние гарантированного минимума  $i$ -го участка в момент времени  $t$ ;

$S_i(t)$  – эффективность вложения средств в  $i$ -й участок в момент времени  $t$ , т.е. прирост состояния от единицы вкладываемых ресурсов;

$d_i(t)$  – внешний фактор, который чаще всего принимает отрицательное значение, связанный с амортизацией и другими техногенными и природными факторами (землетрясение, подземный взрыв на горнорудном предприятии, ремонт автодорожного полотна и т.д.).

Но практика показывает, что многие параметры модели заранее сложно определить. Имеющиеся средства могут изменяться в ходе реализации плана. Цены на расходные материалы, заработная плата персонала также могут измениться. А предугадать случайные внешние факторы и учесть возможный ущерб обычно вообще не возможно. Поэтому вместо детерминированной модели следует использовать стохастическую модель [3]:

$$M \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{y}_i - y_i(t)}{\bar{y}_i} \right) \right\} \rightarrow \min;$$

$$P_1 \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij}(\omega) u_j(t) \leq c_i(t, \omega) \right\} \geq \alpha_1, \quad 0,5 < \alpha_1 < 1;$$

$$P_2 \{ b_i(t) = h_i(t, \omega) \} \geq \alpha_2, \quad 0,5 < \alpha_2 < 1;$$

$$y_i(1) > 0, \quad y_i(t) \geq y_i(t-1), \quad S_i(t, \omega) \geq 0, \quad c_i(t, \omega) > 0, \quad u_i(t) \geq 0; \quad \bar{y}_i \geq y_i(t);$$

$$0 < P_i(t) = y_i(t+1) \leq \bar{y}_i; \quad P_i(t) \geq P_i(t-1); \quad i = \bar{1}, n, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in [1, T],$$

где  $\Omega$  – множество случайных событий, а  $\omega$  – конкретная реализация.

Решение по распределению ресурсов в данной модели принимается на определенный срок, в течение которого негативные последствия случайных величин могли бы быть минимизированы. Для этого ЛПР может воспользоваться многоэтапной моделью принятия решения.

В задачах принятия решений, в которых решение следует за наблюдением, решающие

правила и статистические характеристики решающих распределений представляют собой функции, таблицы или инструкции, устанавливающие зависимость решения как от априорной информации, так и от реализованных значений случайных параметров условий задачи. Решающие правила и решающие распределения в процедуре принятия решения, в которой решение принимается после наблюдения, называют апостериорными [1].

Тогда многоэтапная модель принятия решения примет вид:

$$M_{\omega^n} \Psi_0(\omega^n, y_i^n(t)) = M_{\omega^n} \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{y}_i - y_i(t, \omega^n)}{\bar{y}_i} \right) \right\} \rightarrow \inf;$$

$$M_{\omega^k} \{ \Psi_k(\omega^k, u_i^k(t)) | \omega^{k-1} \} = M_{\omega^k} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \{ u_{ij}(t, \omega^k) | \omega^{k-1} \} \right\} \leq c_k(t, \omega^{k-1});$$

$$y_i(t+1, \omega^{k-1}) - y_i(t, \omega^{k-1}) = S_i(t, \omega^{k-1}) u_i(t, \omega^{k-1}) + d_i(t, \omega^{k-1});$$

$$y_i(t+1, \omega^{k-1}) \geq y_i(t, \omega^{k-1}), y_i(1, \omega^{k-1}) > 0;$$

$$S_i(t, \omega^{k-1}) \geq 0, u_i(t, \omega^{k-1}) \geq 0, c_k(t, \omega^{k-1}) > 0,$$

$$0 < P_i(t) = y_i(t+1, \omega^{k-1}) \leq \bar{y}_i; P_i(t) \geq P_i(t-1);$$

$$i = \overline{1, n}, \omega^k \in \Omega^k = \times_{i=1}^k \Omega_i, t \in [1, T].$$

Т.е., при планировании на k-м этапе производится корректировка первоначального решения по распределению ресурсов и рассматриваются результаты реализации случайных событий до (k-1)-го этапа включительно и прогнозы на k-й этап.

Введем обозначения

$$\Delta_i(t, \omega^{k-1}) = y_i(t+1, \omega^{k-1}) - y_i(t, \omega^{k-1}) \text{ и } f_i(t, \omega^{k-1}) = S_i(t, \omega^{k-1}) u_i(t, \omega^{k-1}) + d_i(t, \omega^{k-1}).$$

Будем вычислять апостериорные решающие правила, т.е. определять решение среди случайных величин  $u_i^n(t, \omega^n) = (u_{i1}(t, \omega^1), u_{i2}(t, \omega^2), \dots, u_{in}(t, \omega^n))$ .

Обозначим через  $p^i$  вероятностную меру на  $\Omega^i$  – множестве элементарных событий  $W$ , определенную следующим образом:

$$p^i(W) = \begin{cases} p(W \times \Omega_{i+1} \times \Omega_{i+2} \times \dots \times \Omega_n) & , \text{ если } W \subset \Omega^i \\ 0 & , \text{ в противном случае} \end{cases}$$

а через  $p_i$  вероятностную меру, определенную следующим образом:

$$\text{для всех } A \subset \Omega_i, B \subset \Omega^{i-1} \quad p_i(A | \omega^{i-1} \in B) = \frac{p^i(A \times B)}{p^i(\Omega_i \times B)}.$$

Мера  $p^n$  является непрерывной. Пусть  $\Sigma - \sigma$  - алгебра случайных событий на  $\Omega$ . Мы определили вероятностное пространство  $(\Omega, \Sigma, P)$ .

Тогда задача может быть переформулирована следующим образом. Требуется минимизировать

$$\sum_{\Omega_n} \Psi_0(\omega^n, y_1(t, \omega^1), y_2(t, \omega^2), \dots, y_n(t, \omega^n)),$$

на совокупности измеримых отображений

$$u_i^n(\omega^n) = (u_{i1}(\omega^1, t), \dots, u_{in}(\omega^n, t)), \quad u_{ij}(\omega^j, t): \Omega^j \rightarrow U_{ij},$$

где  $U_i$  - множества произвольной структуры, такие что  $u_{ij} \in U_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, n}$ ), удовлетворяющие условиям:

$$\begin{aligned} \sum_{\Omega_j} \Psi_j(\omega^j, u_{i1}(t, \omega^1), u_{i2}(t, \omega^2), \dots, u_{ij}(t, \omega^j)) &= \sum_{\Omega_j} \sum_{i=1}^n u_{ij}(t, \omega^j) \leq c_j(t, \omega^{j-1}); \\ \sum_{\Omega_j} \{y_{ij}(t+1, \omega^{j-1}) - y_{ij}(t, \omega^{j-1})\} &= \sum_{\Omega_j} \{S_{ij}(t, \omega^{j-1})u_{ij}(t, \omega^{j-1}) + d_{ij}(t, \omega^{j-1})\}, \\ y_{ij}(t+1, \omega^{j-1}) &\geq y_{ij}(t, \omega^{j-1}), \quad y_{ij}(1, \omega^{j-1}) > 0; \\ S_{ij}(t, \omega^{j-1}) &\geq 0, \quad u_{ij}(t, \omega^{j-1}) \geq 0, \quad c_j(t, \omega^{j-1}) > 0, \\ 0 < P_i(t) = y_i(t+1, \omega^{k-1}) &\leq \bar{y}_i; \quad P_i(t) \geq P_i(t-1); \\ i = \overline{1, n}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \omega^j &\in \Omega^j = \times_{i=1}^j \Omega_i, \quad t \in [1, T]. \end{aligned}$$

Для задачи принятия решений распределения ресурсов с апостериорными решающими правилами в условиях применения комбинированной политики, включающей классический утилитаризм и политику гарантированного минимума, данная задача может быть переформулирована следующим образом. Требуется минимизировать

$$\sum_{\Omega_n} \Psi_0(\omega^n, y_1(t, \omega^1), y_2(t, \omega^2), \dots, y_n(t, \omega^n)) = \sum_{\Omega_n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{y}_i - y_i(t, \omega^n)}{\bar{y}_i} \right),$$

при выполнении условий

$$\begin{aligned} \sum_{\Omega_j} \Psi_j(\omega^j, u_{i1}(t, \omega^1), u_{i2}(t, \omega^2), \dots, u_{ij}(t, \omega^j)) &= \sum_{\Omega_j} \sum_{i=1}^n u_{ij}(t, \omega^j) \leq c_j(t, \omega^{j-1}), \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{\Omega_j} \{y_{ij}(t+1, \omega^{j-1}) - y_{ij}(t, \omega^{j-1})\} &= \sum_{\Omega_j} \{S_{ij}(t, \omega^{j-1})u_{ij}(t, \omega^{j-1}) + d_{ij}(t, \omega^{j-1})\}, \\ y_{ij}(t+1, \omega^{j-1}) &\geq y_{ij}(t, \omega^{j-1}), \quad y_{ij}(1, \omega^{j-1}) > 0; \\ S_{ij}(t, \omega^{j-1}) &\geq 0, \quad u_{ij}(t, \omega^{j-1}) \geq 0, \quad c_j(t, \omega^{j-1}) > 0, \\ 0 < P_i(t) = y_i(t+1, \omega^{k-1}) &\leq \bar{y}_i; \quad P_i(t) \geq P_i(t-1); \\ i = \overline{1, n}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \omega^j &\in \Omega^j = \times_{i=1}^j \Omega_i, \quad t \in [1, T]. \end{aligned}$$

Коррекция первоначально принятого решения связана не с несовершенством одноэтапных моделей, а с возможностью улучшить принятое решение путем точного учета вероятностных факторов в многоэтапной модели. Аналогичная методика может быть применена при распределении ресурсов организации в условиях их острого дефицита при необходимости постоянного поддержания работоспособности объектов. Таким примером может служить распределение ресурсов, выделяемых:

- отделом образования на ремонт школ;
- ГП «Водоканал» на ремонт водопроводов;

- дорожно-строительным управлением на ремонт дорог и т.д.

Список литературы

1. Быкова И. Ю. Исследование проблем принятия решений в условиях четкой и нечеткой информации: Дис... канд. физ.-мат. наук. - СПб.: СПбГУ, 1999. - 152 с.
2. Коротеев С.В. Одноэтапные стохастические модели распределения ресурсов с комбинированным целевым функционалом // Инновационно-коммуникационные технологии как основной фактор развития инновационного общества: Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2007. - Ч. II. - С.229-235.
3. Коротеев С.В. Модель комбинированной политики распределения ресурсов в условиях неполноты информации // Территория науки. 2007. - №4 (5). - С. 495-501.

Получено 12.12.07

УДК 621.365.22

**И.В. Кошкин**

КГУ им. А. Байтурсынова, г. Костанай

**МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
УСТРОЙСТВ ОМП В СЕТЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ**

Надёжность работы электроустановок и потребителей электроэнергии в сетях сельскохозяйственного назначения значительно зависит от уровня эксплуатации электрической сети. Наиболее частым видом повреждений в данных распределительных сетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) и однофазные короткие замыкания, составляющие порядка 70-80 % от общего числа повреждений.

Работа сети при ОЗЗ допускается в течение времени, достаточного для выявления повреждённого элемента сети либо перевода потребителей на другой источник питания и отключения. Между тем длительное присутствие ОЗЗ в сети нередко служит продолжением аварийных ситуаций, к которым относятся и переход однофазного замыкания в междуфазное короткое замыкание; появление двойных замыканий на землю в разных точках сети при перенапряжениях; возникновение феррорезонансных явлений, появление пожаров, разрушение опор и опасность поражения током человека, оказавшегося поблизости. Даже воздушные линии (ВЛ) с использованием современных проводов с защитной изоляцией марки СИП полностью не исключают опасности поражения электрическим током. Поэтому проблема скорейшего определения места повреждения и локализации аварии остается актуальной.

Устройства для автоматического поиска места повреждения в сетях сельскохозяйственного назначения 6-10 кВ используются только для предварительного определения расстояния до места дефекта с последующим использованием трассовых методов. Дистанционный метод позволяет определить зону повреждения (в пределах погрешности измерения) и применить отдельные трассовые методы обнаружения только на небольших участках трассы с целью сокращения времени точного определения места повреждения.

Принципиально новые возможности для повышения эффективности применения устройств определения мест повреждения (УОМП) появляются при резистивном заземлении нейтрали сети, которое в последние годы всё чаще используется в энергосистемах. При этом токи и напряжения нулевой последовательности не зависят от места замыкания на

землю, а зависят лишь от полноты замыкания, то есть от значения переходного сопротивления в месте повреждения [1].

Целью данной работы является разработка методики фиксирования параметров аварийного режима с учетом влияния переходного сопротивления в месте аварии в сельских ВЛ 6-10 кВ.

При междуфазном коротком замыкании переходное сопротивление в первоначальный момент времени состоит только из сопротивления возникшей дуги и достигает небольших значений.

При замыкании одной фазы на землю переходное сопротивление складывается из сопротивления дуги, перекрывающей гирлянду изоляторов, сопротивления опоры и сопротивления заземляющего контура опоры. Поэтому в сетях с воздушными линиями электропередачи в месте ОЗЗ могут возникать большие переходные сопротивления, приводящие к уменьшению напряжений и токов нулевой последовательности на сборных шинах в присоединениях.

Фиксирующие устройства, применяемые в настоящее время для эффективной эксплуатации и защиты линий напряжением 6-10 кВ, в основном измеряют вектора токов и напряжений нулевой последовательности [1]. Однако в сетях 6-10 кВ могут происходить повреждения, при которых протекают или отсутствуют токи нулевой последовательности, например обрыв фазного провода на воздушной ЛЭП без касания с опорой. При этом устройства, использующие в своём алгоритме ток нулевой последовательности, не способны отреагировать на такие повреждения. Наиболее часто встречаются также обрывы грозозащитных тросов при подходах к подстанциям, где также могут появляться различные значения параметров аварийного режима. При падении провода на снег, лед, камни, сухой песок, дерево и т.д. в месте замыкания появляется очень большое переходное сопротивление, которое не позволяет устройствам, фиксирующим не только параметры обратной последовательности, но и полное сопротивление цепи замыкания, определенно зафиксировать расстояние до места обрыва. Кроме того, при применении на ВЛ изолированного провода и при его обрыве и падении на землю, фиксирующее устройство может и не подействовать.

Однако наличие в нейтрали сети заземляющего резистора приводит к появлению активного тока, протекающего через повреждённое присоединение при ОЗЗ. При условии правильного выбора сопротивления резистора УОМП способны более эффективно и точно производить считывание параметров аварийного режима.

По итогам вышеуказанного анализа предлагаются следующие мероприятия. Процесс фиксирования при ОЗЗ должен выполняться избирательно в несколько ступеней. Первая, основная ступень, должна действовать на сигнал, давая возможность персоналу сетей определить тип повреждения (металлическое замыкание, падение провода на землю, обрыв троса на фазный провод и т.д.) и выполнить технические мероприятия для более надежного электроснабжения потребителя. Вторая ступень с установленными фиксирующими приборами должна срабатывать при возникновении металлических замыканий на землю, а также замыканий через небольшие переходные сопротивления. Третья ступень должна срабатывать при обрывах фаз линии, при которых возникают в месте ОЗЗ большие значения переходных сопротивлений, а также при обрывах провода фазы ЛЭП без касания его с землей. Исполнительным импульсом при этом может быть ток обратной последовательности или отношение тока обратной последовательности к току прямой последовательности.

тельности. Блок-схема алгоритма функционирования УОМП показана на рис. 1.

В данном случае необходимо определять значение переходного сопротивления  $R_{\Pi}$  по методу измерений фиксирующих амперметров и вольтметров и расчета по выражению [2]:

$$R_{\Pi} = \frac{U'_0}{3I_0}, \quad (1)$$

где  $U'_0$  – напряжение поврежденной фазы в точке ОЗЗ, определяемое расчетным путем с учетом значений пассивных параметров ВЛ для прямой и обратной последовательностей и с учетом результатов измерений тока и напряжений нулевой последовательности фиксирующими приборами;

$I_0$  – ток поврежденной фазы.

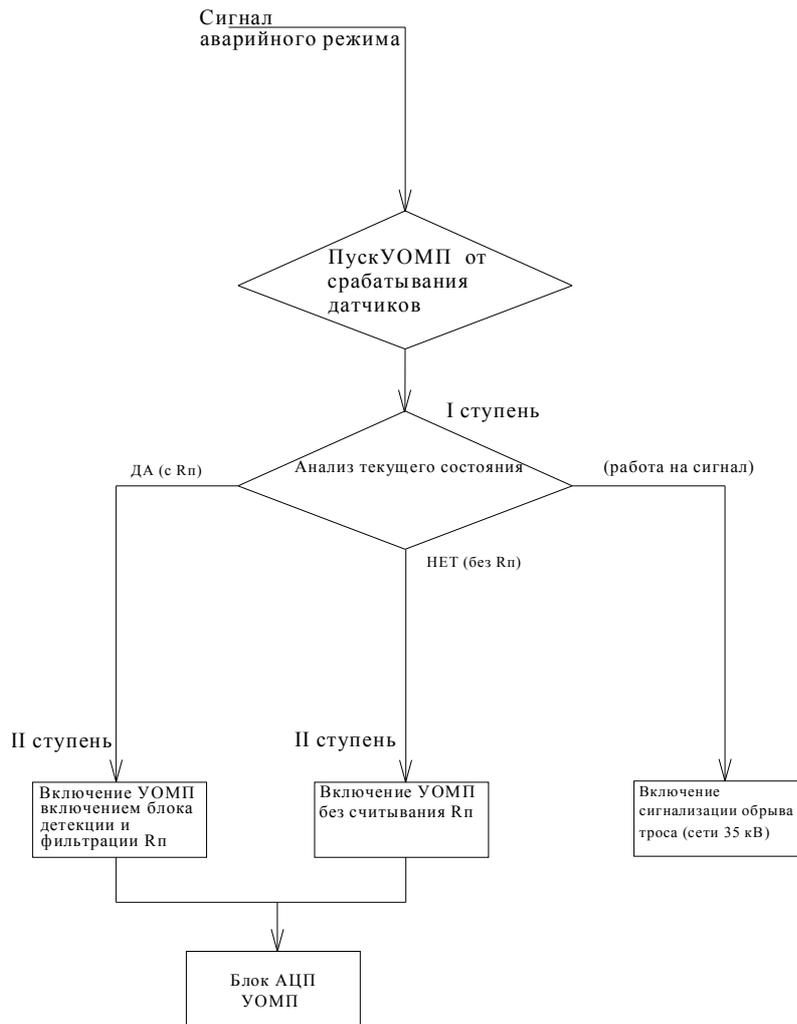


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма функционирования УОМП

При вычислении фазного напряжения  $U'_{Ф.К.}$  принимается, что напряжения нулевой и обратной последовательностей совпадают по фазе и сдвинуты на  $180^\circ$  относительно на-

пряжения прямой последовательности. Такое допущение, естественно, вносит определенную погрешность. Однако для сравнительной оценки сопротивления заземления  $R_{зз}$  и сопротивления дуги  $R_{д}$  погрешностью можно пренебречь. Для точного определения сопротивления  $R_{зз}$  необходимо проводить осциллографические измерения тока и напряжения при замыкании на землю.

Для оценки влияния переходного сопротивления  $R_{п}$  на точность работы фиксирующего прибора, измеряющего полное сопротивление (расстояние) до места ОЗЗ, определяем переходное сопротивление в месте повреждения через экспериментальные и каталожные данные линии

$$R_{п} = \frac{U'_0}{3I_0} = \frac{U_0}{\frac{U_{\Phi,0}}{K_{ВЛ}} \cdot L_{ВЛ}} = \frac{U_0}{U_{\Phi,0}} \cdot \frac{K_{ВЛ}}{L_{ВЛ}}, \quad (2)$$

где  $K_{ВЛ}$  – эмпирический коэффициент, принимаемый для воздушных линий электропередачи 350-400;

$L_{ВЛ}$  – расстояние до места повреждения в масштабе длины.

Так как в автоматическом режиме довольно сложно точно настроить резистор в нейтрали на величину переходного сопротивления, необходимо разработать средства третьей ступени, реагирующие на параметры аварийного режима и производящие фильтрацию активной составляющей тока поперечной цепи замыкания на землю в сельских распределительных сетях.

#### Список литературы

1. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 175 с.
2. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.

Получено 12.12.07

УДК 621.311.025.3.048.1

**А.Б. Уахитова**

ПГУ им. С. Торайгырова, г. Павлодар

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ В ТРЕХФАЗНОЙ СИММЕТРИЧНОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В

Для повышения уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок на горных предприятиях необходимо производить контроль состояния изоляции, так как она подвержена динамическому износу, который обусловлен тяжелыми условиями труда: механические воздействия, запыленность, влияние климатометеорологических условий и т.д.

Существующие методики контроля параметров изоляции не нашли широкого применения при эксплуатации электроустановок на горных предприятиях. Поэтому настоящая работа посвящена разработке методики исследования параметров изоляции в трехфазной

симметричной сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В.

В практике эксплуатации электроустановок напряжением выше 1000 В требуется периодически производить контроль за состоянием изоляции. Для проведения экспериментальных исследований состояния изоляции в системе внутреннего электроснабжения предприятий разработана методика, в основу которой положен метод определения параметров изоляции в трехфазной симметричной сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В, который заключается в измерении величин модулей линейного напряжения ( $U_{л}$ ), напряжения нулевой последовательности ( $U_0$ ), напряжения фазы относительно земли ( $U_{\phi 0}$ ) до и после подключения между ней и землей активной дополнительной проводимости ( $g_0$ ), а также измерении угла ( $\alpha$ ) сдвига фаз между векторами линейного напряжения и напряжения фазы относительно земли.

Определение параметров производится по математическим зависимостям:

– активная проводимость изоляции электрической сети

$$g = \left( \frac{U_{л}(0,58U_{л} - U_{\phi 0} \sin \alpha) - U_0^2}{U_0^2} \right) g_0, \quad (1)$$

– емкостная проводимость изоляции электрической сети

$$b = \frac{U_{л} U_{\phi 0} \cos \alpha g_0}{U_0^2}, \quad (2)$$

– полная проводимость изоляции сети

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}. \quad (3)$$

Исследования состояния изоляции производятся по принципиальной схеме (рис.1), содержащей: исследуемую трехфазную электрическую сеть с изолированной нейтралью, с фазами А, В и С; емкостные проводимости изоляции сети  $b_A$ ,  $b_B$ ,  $b_C$ ; активные проводимости изоляции сети  $g_A$ ,  $g_B$ ,  $g_C$ ; активную дополнительную проводимость, подключаемую между фазой А электрической сети и землей; TV – измерительный трансформатор напряжения типа НТМИ-6; QF – выключатель нагрузки, коммутирующий дополнительную активную проводимость между фазой А электрической сети и землей; PV1 – вольтметр, измеряющий величину модуля линейного напряжения; PV2 – вольтметр, измеряющий величину модуля напряжения фазы А относительно земли; PV3 – вольтметр, измеряющий величину модуля ННП; измерительный прибор PV3, производящий измерение угла сдвига фаз  $\alpha$  между векторами линейного напряжения и напряжения фазы относительно земли.

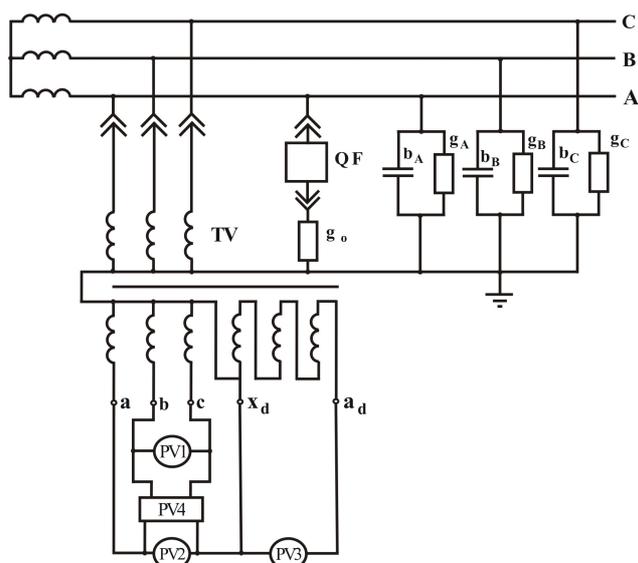


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная исследования параметров изоляции в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В

Для измерений величин модулей напряжений используются вольтметры типа Э-515 с классом точности 0,5 и пределами измерения напряжения  $U = 0 \div 150$  В.

В качестве активной дополнительной проводимости используется сопротивление типа ПЭ-2000 с номинальной величиной  $R = 1000$  Ом.

Экспериментальные исследования состояния изоляции на горных предприятиях в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью осуществляются по следующей методике:

1. Выбирается резервная ячейка КРУ напряжением 6 кВ.
2. Производится опробование ячейки на работоспособность.
3. Для производства работ по подготовке коммутации силовых цепей выкатывается ячейка выключателя нагрузки QF.

4. Между фазой А ячейки выключателя нагрузки QF и землей подключается известная активная дополнительная проводимость –  $g_o$ .

5. На ячейке трансформатора напряжения TV производится проверка напряжения фазы относительно земли, линейного напряжения и ННП исследуемой сети.

6. После проверки напряжений выкатывается ячейка трансформатора напряжения TV провод  $x_d$ , выводя тем самым защиту от ОЗЗ, и подготавливаем цепи измерения величины модуля ННП.

7. Закатывается ячейка трансформатора напряжения TV, и на измерительные клеммы подключаются вольтметры PV1, PV2 и PV3, измеряющие величины модулей линейного напряжения, напряжения фазы относительно земли и ННП, а также измерительный прибор PV3, производящий измерение угла сдвига фаз  $\alpha$  между векторами линейного напряжения и напряжения фазы относительно земли.

8. После проведения всех подготовительных работ, указанных в пп. 1÷7, производится вкатывание ячейки выключателя нагрузки QF и записываются показания измерительных приборов. После регистрации измеряемых величин выключателем нагрузки QF производится подключение активной дополнительной проводимости  $g_o$  между фазой А электри-

ческой сети и земель и записываются показания измерительных приборов. После регистрации измеряемых величин при подключенной активной дополнительной проводимости  $g_0$  производится отключение выключателя нагрузки QF.

9. После окончания эксперимента по пункту 8 ячейка выключателя нагрузки QF выкачивается, отключаются цепи включения активной дополнительной проводимости, и ячейка выключателя нагрузки вкатывается в исходное положение секции КРУ. Аналогично производятся работы на секции трансформатора напряжения TV, где отключаются цепи подключения вольтметров PV1, PV2, PV3 и восстанавливается цепь управления защиты от ОЗЗ.

Измерения должны проводиться в соответствии с требованиями техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей бригадой высококвалифицированных специалистов в составе не менее двух человек.

Разработанная методика экспериментального исследования состояния изоляции на горных предприятиях (в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью) обеспечивает удовлетворительную точность определения искомых величин, простоту и безопасность производства работ в действующих электроустановках напряжением выше 1000 В.

Список литературы

1. Вестник ПГУ: Научный журнал Павлодарского гос. ун-та им. С.Торайгырова. - 2007. - № 2. - Павлодар, 2007. - С. 24.

Получено 10.12.07

---

УДК 621.313.335

**Б.Б. Утегулов, А.П. Косогоров, С.К. Жумажанов**  
ПГУ им. С. Торайгырова, г. Павлодар

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОЛОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ПРЕДЕЛЬНЫХ СКОЛЬЖЕНИЙ И ПОСТОЯННОЙ ИНЕРЦИИ РОТОРА АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА**

Увеличение числа и установленной мощности электроприемников с резкопеременными (ударными) нагрузками (например прокатные станы, дуговые сталеплавильные печи и др.) увеличивает их влияние как на работу электроприемников со спокойной нагрузкой, так и на работу электроэнергетических систем в целом, которое проявляется в виде колебаний модуля и фазы напряжения в узлах электрической сети.

Основной причиной качаний роторов синхронных двигателей со спокойной нагрузкой на валу являются колебания фазы напряжения в узлах электрической сети. Это подтверждается тем, что качания роторов синхронных двигателей, подключенных параллельно мощному синхронному двигателю с ударной нагрузкой на валу, не уменьшаются при относительно высоком качестве поддержания уровня модуля напряжения, если при этом не осуществляется гашение колебаний фазы напряжения. Чувствительны к колебаниям фазы напряжения и сами резкопеременные нагрузки. Так колебания фазы напряжения в тиристорных электроприводах вызывает трудности в отношении точного поддержания скорости вращения роторов электрических машин.

Таким образом, колебания модуля и фазы напряжения обусловлены нарушением балансов реактивных и активных мощностей в электрических сетях под воздействием потребителей с резкопеременными нагрузками [1, 2].

Устройством, способным компенсировать колебания не только реактивной, но и активной мощности и тем самым уменьшить колебания модуля и фазы напряжения в узлах сети, является асинхронизированный синхронный компенсатор (АСК), который может потреблять или выдавать в сеть активную мощность кратковременно, что обусловлено его параметрами [3].

АСК – это комплекс, состоящий из электрической машины переменного тока, системы возбуждения и системы автоматического управления возбуждением. Электрическая машина, входящая в комплекс АСК, имеет на роторе не менее двух обмоток возбуждения, которые питаются от индивидуальных источников питания, управляемых общим автоматическим регулятором, что позволяет с высокой скоростью управлять пространственным положением результирующего вектора магнитного поля относительно ротора машины [4]. Это дает возможность обеспечить генерирование или потребление активной мощности АСК за счет изменения кинетической энергии маховых масс ротора электрической машины. Следовательно, время работы АСК в режимах генерирования или потребления активной мощности зависит от таких параметров, как потолочные напряжения обмоток возбуждения, предельные величины диапазона скольжений и постоянной инерции ротора АСК при активной нагрузке статора электрической машины.

Таким образом, при применении АСК для компенсации колебаний активной и реактивной мощности в электрической сети, питающей потребителей с резкопеременной нагрузкой, необходима методика определения параметров его элементов, в частности потолочного напряжения, диапазона скольжений и постоянной инерции ротора электрической машины, входящей в состав АСК.

Колебания модуля и фазы напряжения могут быть полностью устранены (идеальная компенсация), если с помощью АСК будут компенсированы колебания реактивного и активного токов в электрической сети, т.е. будет обеспечено выполнение следующих условий [5, 6]:

$$|i_{кр}| = |i_{вр}|, \quad (1)$$

$$|i_{ка}| = |i_{ва}|, \quad (2)$$

$$\left| \frac{di_{кр}}{dt} \right| \geq \left| \frac{di_{вр}}{dt} \right|, \quad (3)$$

$$\left| \frac{di_{ка}}{dt} \right| \geq \left| \frac{di_{ва}}{dt} \right|. \quad (4)$$

Здесь

$$i_{вр} = i_{ср} - i_{ор}, \quad (5)$$

$$i_{ва} = i_{са} - i_{оа}, \quad (6)$$

где  $i_{кр}$ ,  $i_{ка}$  – реактивный и активный токи статора АСК;

$i_{вр}$ ,  $i_{ва}$  – переменные составляющие реактивного и активного токов в электриче-

ской сети;

$i_{cp}, i_{ca}$  – текущие значения реактивного и активного токов в электрической сети;

$i_{op}, i_{oa}$  – заданные значения реактивного и активного токов в сети.

То есть, кроме равенства абсолютных величин переменных составляющих реактивного и активного токов, реактивному и активному токам статора АСК необходимо также, чтобы абсолютные величины скоростей изменения токов компенсирующего устройства были больше или равны скоростям изменения токов в электрической сети.

Величина потолочного напряжения ротора АСК, при которой обеспечивались бы требуемые скорости изменения активного и реактивного токов (мощностей) статора, может быть определена при совместном решении уравнений равновесия напряжений статора и ротора электрической машины [6]. Так, не учитывая активное сопротивление и переходные процессы в обмотках статора, эти уравнения в координатных осях, вращающихся с синхронной скоростью (индексы  $d, q$  для краткости опускаем), получим, совместив вектор напряжения обмоток статора с положительным направлением координатной оси  $q$ :

$$jU = x\bar{i} + \bar{e}_f; \quad (7)$$

$$\bar{U}_f = (p - js)T_f\mu x\bar{i} + [1 + (p - js)T_f] \bar{e}_f, \quad (8)$$

где  $U$  – напряжение статора машины;

$\bar{U}_f$  – вектор напряжения ротора машины;

$\bar{i}$  – вектор тока статора;

$\bar{e}_f$  – вектор тока ротора, численно равный э.д.с., наведенной токами ротора в обмотке статора машины;

$x$  – реактивное сопротивление статора машины;

$T_f$  – постоянные времени обмоток статора и ротора;

$\mu$  – коэффициент магнитной связи между обмотками статора и ротора машины;

$S$  – абсолютное скольжение ротора машины;

$p = d/dt$  – символ дифференцирования.

Из уравнений (7) и (8) можно определить напряжение  $\bar{U}_{f\Pi}$ , которое должно быть при-

ложено к обмоткам ротора машины для обеспечения условий компенсации колебаний активного и реактивного токов в электрической сети:

$$\bar{U}_{f\Pi} = (p - js)T_f\mu x\bar{i} + [1 + (p - js)T_f] (jU - x\bar{i}). \quad (9)$$

Принимая допущение, что вектор напряжения в узле электрической сети в результате управления режимом работы АСК не изменяется (т.е.  $\bar{U} = \text{const}$ ), после некоторых преобразований выражения (9) получим

$$\bar{U}_{f\Pi} = jU(1 - jsT_f) - (1 - jsT_f^1)x\bar{i} - T_f^1xp\bar{i}, \quad (10)$$

где  $T_f^1 = (1 - \mu)T_f$  – постоянная времени обмотки ротора при закороченной обмотке статора машины.

Выразив ток статора через активную и реактивную мощности как

$$\bar{i} = i_a + ji_p = \frac{\bar{S}}{U} = \frac{P}{U} - j\frac{Q}{U}, \quad (11)$$

выражение (10) можно записать в следующем виде:

$$\bar{U}_{fn} = jU(1 + jsT_f) - \frac{x}{U}(1 - jsT_f^1)(P - jQ) - \frac{T_f x}{U}p(P - jQ). \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что вектор напряжения, приложенного к обмоткам ротора, можно рассматривать как сумму трех векторов, т.е.

$$\bar{U}_{fn} = \bar{U}_{fx} + \bar{U}_{fv} + \bar{U}_{fp}. \quad (13)$$

Первое слагаемое представляет собой вектор напряжения

$$\bar{U}_{fx} = jU(1 + jsT_f), \quad (14)$$

который должен быть приложен к обмоткам ротора АСК при его работе в режиме холостого хода со скольжением, равным  $s$ .

Второе слагаемое представляет собой вектор напряжения

$$\bar{U}_{fv} = -\frac{x}{U}(1 - jsT_f^1)(P - jQ), \quad (15)$$

который необходимо приложить к обмоткам ротора АСК для компенсации постоянной составляющей реактивной мощности, а также переменных составляющих активной и реактивной мощностей для выполнения условий (1) и (2) при работе машины со скольжением, равным  $s$ .

Третье слагаемое представляет собой вектор напряжения ротора АСК

$$\bar{U}_{fp} = -\frac{T_f x}{U}p(P - jQ), \quad (16)$$

который обеспечивает требуемые скорости изменения активной и реактивной мощностей статора машины для выполнения условий (3) и (4).

Модуль потолочного напряжения ротора АСК, которое необходимо для выполнения условий (1), (2) и (3), (4), после преобразований выражений (10) и (12) определяется по математической зависимости

$$U_{fn} = \sqrt{\left[ \frac{sT_f U^2}{x} - P + T_f^1(sQ + pP) \right]^2 + \left[ \frac{U^2}{x} + Q + T_f^1(sP - pQ) \right]^2}. \quad (17)$$

Потолочное напряжение обмоток ротора АСК ограничивается источником питания ротора (преобразователем частоты) или изоляцией обмоток ротора. В связи с этим, при заданном «потолочном» напряжении ротора возникает необходимость в определении предельных скольжений, с которыми может работать электрическая машина, обеспечивая требуемые по условиям (3), (4) скорости изменения мощностей статора.

Решив уравнение (17) относительно скольжения ротора машины, после некоторых

преобразований получается

$$s_{\text{пр}} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 + (U^2 U_{\text{фн}} - B - C) D}}{T_f D}, \quad (18)$$

где A, B, C и D – некоторые коэффициенты, равные:

$$A = \mu x P U^2 + T_f U^2 x^1 p P + T_f x^1 (Q p P - P p Q), \quad (19)$$

$$B = (U^2 + Q x)^2 + P^2 x^2 + 2 T_f x^1 (P p P + Q p Q), \quad (20)$$

$$C = 2 T_f U^2 x^1 p Q + T_f^2 x^1 (p P)^2 + T_f^2 x^1 (p Q)^2, \quad (21)$$

$$D = (U^2 + Q x^1)^2 + P^2 x^1. \quad (22)$$

При определении предельных значений диапазонов скольжений в установившемся режиме работы АСК (колебания активной и реактивной мощностей отсутствуют) и компенсации части постоянной составляющей реактивной мощности в электрической сети формула (18) примет вид:

$$s_{\text{пуст.}} = \pm \frac{\sqrt{U^2 U_{\text{фн}} - (U^2 + k Q_c x) (U^2 + k Q_c x^1)^2}}{T_f (U^2 + k Q_c x^1)^2}, \quad (23)$$

где  $Q_c$  – постоянная составляющая реактивной мощности в сети;

$k$  – коэффициент, определяющий долю постоянной составляющей реактивной мощности в сети, компенсируемой АСК.

Как упоминалось выше, генерирование или потребление активной мощности АСК обусловлено изменением кинетической энергии маховых масс ротора электрической машины. Следовательно, время работы АСК в режимах генератора или двигателя зависит от располагаемого диапазона скольжений, постоянной инерции ротора и активной нагрузки статора электрической машины.

Пренебрегая механическими потерями, механический момент на валу ротора АСК можно принять равным нулю, т.е. электромагнитный момент АСК при небольших изменениях частоты в электрической системе, согласно [4], может быть, принят равным электромагнитной мощности статора машины, ( $M_{\text{э}} \approx P_{\text{э}}$ ), тогда уравнение движения ротора будет равно

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_{\text{э}}, \quad (24)$$

где  $M_{\text{э}}$  – электромагнитный момент статора машины;

$T_j$  – момент инерции ротора машины;

$s$  – абсолютное скольжение ротора машины.

Из уравнения (24), в некотором диапазоне скольжений, можно определить время рабо-

ты АСК в режимах генерирования или потребления активной мощности, например, исходя из условия поддержания в заданных пределах фазы напряжения в узле электрической сети, который подвержен воздействию резкопеременной нагрузки

$$t_p = T_j \int_{-s_1}^{s_2} \frac{ds}{M_\Omega} \approx T_j \int_{-s_1}^{s_2} \frac{ds}{P_\Omega}, \quad (25)$$

где  $t_p$  – время работы АСК в режимах генерирования или потребления активной мощности;

$s_1, s_2$  – соответственно начальное и конечное скольжения ротора машины.

В общем случае решение выражения (25) представляет сложность, так как электромагнитная мощность статора машины является функцией многих переменных, а скольжение, в свою очередь, является функцией электромагнитной мощности. Допуская, что АСК переходит из одного режима в другой мгновенно и электромагнитная мощность в любом режиме в периоды наброса или сброса нагрузки постоянна, записывается математическим выражением

$$t_{пр} = \frac{T_j}{P_\Omega} (s_2 + s_1). \quad (26)$$

Предельное время работы АСК в режимах генерирования или потребления активной мощности можно определить, если в формулу (26) подставить предельные значения рассматриваемого диапазона скольжений ротора машины

$$t_{пр} = \frac{T_j}{P_\Omega} (s_{п2} + s_{п1}), \quad (27)$$

где  $s_{п1}$  и  $s_{п2}$  – предельные значения диапазона скольжений ротора машины.

Предельные значения диапазона скольжений ротора АСК при заданных параметрах режима электрической сети и при заданных параметрах электрической машины могут быть определены по формулам, приведенным в [6], анализ которых показывает, что диапазон скольжений в режиме генератора  $s_{пг}$  отличается от диапазона скольжений в режиме двигателя  $s_{пд}$ , т.е.  $s_{пг} \neq s_{пд}$ .

Диапазон скольжений ротора АСК должен определяться наименьшими по абсолютной величине предельными значениями скольжений в режиме генерирования и потребления активной мощности. В противном случае, при переходе машины из одного режима в другой при скольжении ротора, превышающем предельную величину, могут быть не обеспечены требуемые скорости изменения активной и реактивной мощностей статора или вообще может быть затруднено изменение режима работы машины.

Использование всего диапазона скольжений АСК возможно в том случае, если очередность набросов и сбросов активной мощности в электрической сети, которыми определяется режим работы машины, известна и, следовательно, есть возможность задать скольжение такой величины, чтобы оно соответствовало началу работы в том или ином режиме.

Запас кинетической энергии ротора АСК, который может быть использован для компенсации колебаний активной мощности в электрической сети в пределах какой-либо половины диапазона скольжений ротора машины, согласно [5], определяется по следующей формуле

$$W_3 = \int_0^t P_{vi}(t) dt = \frac{T_j}{2} (s_{ni}^2 + 2s_{ni}), \quad (28)$$

где  $W_3$  – кинетическая энергия, запасенная ротором машины;

$t$  – время, в течение которого запасается или расходуется кинетическая энергия ротора машины;

$s_{ni}$  – величины диапазона скольжения ротора машины.

Активная энергия переменной составляющей активной мощности в электрической сети  $W_v$  определяется как

$$W_v = \int_0^{t_i} P_{vi}(t) dt = \int_0^{t_i} [P_c(t) - P_0] dt, \quad (29)$$

где  $P_{vi}$  – переменная составляющая активной мощности на интервале времени  $i$ ;

$P_c, P_0$  – текущая и заданная активные мощности в сети;

$t_i$  – интервал времени  $i$ .

Принимая допущение равенства кинетической энергии ротора и энергии переменной составляющей активной мощности в электрической сети, при совместном решении уравнений (28) и (29) можно определить величину постоянной инерции ротора АСК, которая необходима для обеспечения компенсации колебаний активной мощности в электрической сети на интервале времени  $t_i$ :

$$T_j = \frac{2}{s_{ni}^2 + s_{ni}} \int_0^{t_i} P_{vi}(t) dt. \quad (30)$$

Если активную энергию переменной составляющей активной мощности в электрической сети представить как среднюю величину на интервале времени  $t_i$

$$W_{vi} = \int_0^{t_i} P_{vi}(t) dt = P_{vcp_i} t_i, \quad (31)$$

то постоянная инерции ротора АСК равна

$$T_j = \frac{2P_{vcp_i} t_i}{s_{ni}^2 + 2s_{ni}}. \quad (32)$$

Необходимая величина махового момента ротора АСК определяется следующим образом [6]:

$$GD^2 = \frac{2S_H P_{vcp_i} t_i 10^3}{2,74n^2 (s_{ni}^2 + 2s_{ni})^2}, \quad (33)$$

где  $n$  – скорость вращения ротора машины;

$S_H$  – номинальная полная мощность статора машины.

В формулы (32) и (33) необходимо подставлять абсолютные величины скольжений ротора АСК, так как постоянная инерции и маховый момент ротора электрической машины не могут быть отрицательными величинами.

В общем случае для определения потолочного напряжения и предельных значений

диапазонов скольжений ротора АСК необходимы графики активной и реактивной мощностей в электрической сети, подлежащих компенсации.

При необходимости величину махового момента ротора электрической машины можно увеличить с помощью инерционного накопителя энергии [7], что может значительно расширить возможности АСК.

Список литературы

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - 4-е изд. - М.: Высшая школа, 1985. - 515 с.
2. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И.Соколов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 336 с.
3. А.с.1336594/24 (СССР). Способ регулирования асинхронизированного синхронного компенсатора / М.М.Ботвинник, Т.В.Плотникова, Ю.Г.Шакарян; Оpubл. в бюлл. «Открытия. Изобретения. Пром. Образцы. Товарные знаки». - 1971. - №1.
4. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины.- М.: Энергоатомиздат, 1984. - 192 с.
5. Косогоров А.П. Расчет режимов системы электроснабжения с асинхронизированным синхронным компенсатором // Труды МЭИ. - 1978. - Вып.371. - С.7-11.
6. Косогоров А.П. О возможности оценки колебаний фазы и частоты напряжения в электрической сети. // Становление и развитие Экибастузского региона: Междунар. науч.-практ. конф. - Екибастуз, 2003. - С. 91-95.
7. Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах / Ю.Н.Астахов, В.А.Веников, А.Г.Тер-Газарян. - М.: Высшая школа, 1989. - 159 с.

Получено 23.11.07