

ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В. В. АРХИПЕНКО, В. А. ТРОШИН, Н. Е. ЧЕРНЫЙ.

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических систем и сетей)

Сложившаяся на промышленных предприятиях практика эксплуатации синхронных двигателей (СД) — использование полной компенсирующей способности всех двигателей независимо от удельных затрат на компенсацию и от электрической удаленности СД от центров питания — приводит во многих случаях к неоправданным перерасходам электроэнергии и к снижению качества напряжения у электроприемников.

Анализ показывает, что промышленные предприятия Союза располагают резервом экономии электроэнергии в 1 млрд. квт·час/год, который может быть реализован за счет оптимального использования компенсирующей способности СД. В этой связи представляется весьма актуальным внедрение в практику эксплуатации СД научно обоснованных инженерных методов расчета оптимальных режимов возбуждения.

В настоящей статье даются теоретические предпосылки и общие положения инженерных методов решения задачи оптимизации применительно к действующим предприятиям.

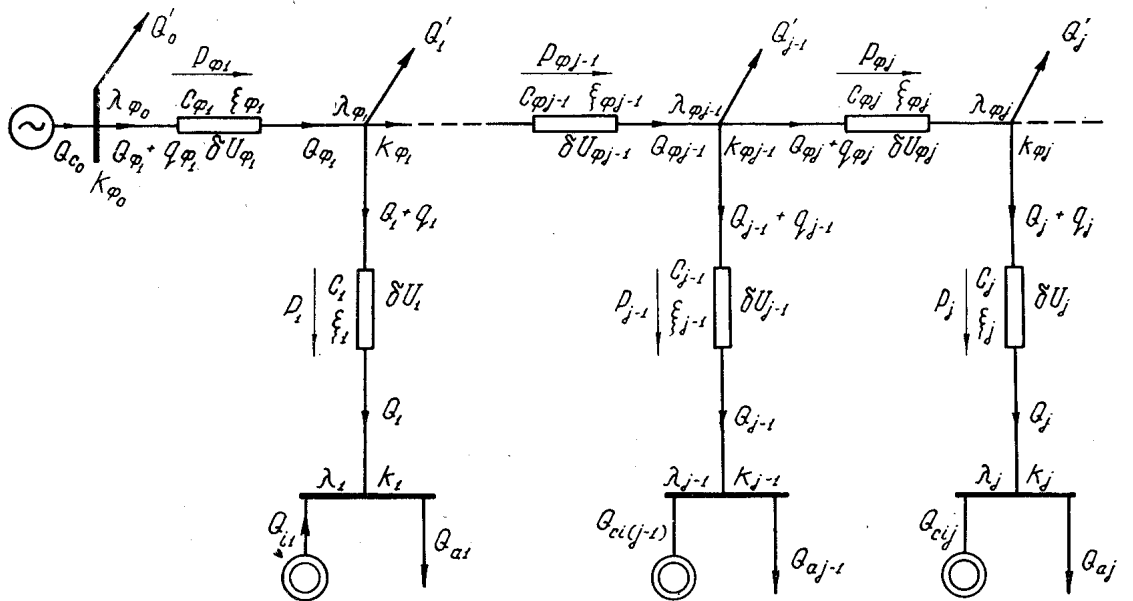


Рис. 1. Расчетная схема характерного узла нагрузки

Оптимальный режим возбуждения СД на действующем предприятии выбирается из условия минимума суммарных эквивалентных потерь в узле нагрузки (рис. 1).

$$p_{\Sigma}^{\Sigma} = p_{\Sigma}^I + p_{\Sigma}^U, \quad (1)$$

где

p_{Σ}^I — потери, зависящие от реактивного тока в питающих и распределительных сетях, в статорах синхронных машин (двигателей, генераторов, компенсаторов), и потери, зависящие от токов возбуждения и возбудителя синхронных машин, *квт*;

p_{Σ}^U — потери в сетях и электроприемниках, зависящие от напряжения, а также эквивалентные потери, с помощью которых учитывается изменение производительности, оборудования, срока службы изоляции электродвигателей и другие факторы [1] при отклонении напряжения у электроприемников от оптимальных значений, *квт*.

Составляющие суммарных потерь удобно представить в следующем виде:

$$p_{\Sigma}^I = \sum_{j=1}^l \left[\frac{c_{\Phi j}}{2} Q_{\Phi j}^2 + \frac{c_j}{2} Q_j^2 + \sum_{i=1}^{m_j} \left(\frac{d_{ij}}{2} Q_{c_{ij}}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \theta_{ij} Q_{c_{ij}} \right) n_{ij} + \frac{a_0}{2} (Q_{\Phi 1} + Q_{\partial p})^2 + \theta_0 (Q_{\Phi 1} + Q_{\partial p}) \right], \quad (2)$$

$$p_{\Sigma}^U = \sum_{j=1}^l \left(\frac{e_{\Phi j}}{2} k_{\Phi j}^2 + f_{\Phi j} k_{\Phi j} + \frac{e_j}{2} k_j^2 + f_j k_j \right). \quad (3)$$

В выражениях (2), (3) обозначения Q и Q_{Φ} с индексами соответствуют реактивным мощностям отдельных участков сети, *квар*;

Q_c с индексами — реактивным мощностям СД, *квар*;

k , k_{Φ} с индексами — уровням напряжения в узловых точках, *о. е.*

$$k = \frac{U}{U_n};$$

a , b , c , d с индексами — удельным приростам потерь в СД и сетях от реактивной мощности;

e , f с индексами — удельным приростам потерь в элементах узла нагрузки от уровня напряжения.

Удельные приросты рассчитываются по следующим формулам:

$$a = \frac{2A}{Q_{c.n.}^2}, \text{ квт/квар}^2; \quad b = \frac{B}{Q_{c.n.}}, \text{ квт/квар},$$

$$c = \sum_{s=1}^r \frac{2r_s}{U_s^2} \cdot 10^{-3}, \text{ квт/квар}^2; \quad d = \sum_{s=1}^r \frac{2x_s}{U_s^2} \cdot 10^{-3}, \text{ квар/квар}^2.$$

$$e = \frac{2E}{3_{\Phi}}, \text{ квт/о.е.}^2; \quad f = \frac{F}{3_{\Phi}}, \text{ квт/о.е.},$$

где

A , B — постоянные потерь синхронной машины, *квт* [2];

$Q_{c.n.}$ — номинальное значение реактивной мощности синхронной машины, *квар*;

r_s , x_s , U_s — активное и индуктивное сопротивления, *ом* и среднее значение напряжения, *кв* s -ого последовательного эле-

мента сети (трансформаторы, реакторы, ЛЭП различных сечений и напряжений);

- r — число последовательных элементов сети;
 E, F — коэффициенты при полиноме вида $y = Ek^2 + Fk + L$ руб/час, которым аппроксимируется функция ущерба по напряжению [1];
 z_3 — стоимость потерь электроэнергии руб/квт-час.

В выражениях (2), (3) искомые переменные (реактивные мощности синхронных машин, сетей и уровни напряжения) связаны между собой уравнениями вида:

$$\varphi_{1j} = Q_{aj} - \sum_{i=1}^{m_j} Q_{cij} n_{ij} - Q_j = 0. \quad (4)$$

$$\varphi_{2j} = Q_{\phi_j} - Q_{\phi_{j+1}} - Q_j - q_{\phi_{j+1}} - q_j - Q'_j = 0, \quad (5)$$

$$\varphi_{3j} = k_{\phi_{j-1}} - \frac{c_{\phi_j}}{2} P_{\phi_j} - \frac{c_{\phi_j}}{2\epsilon_{\phi_j}} Q_{\phi_j} + \delta U_{\phi_j} - k_{\phi_j} = 0, \quad (6)$$

$$\varphi_{4j} = k_{\phi_j} - \frac{c_j}{2} P_j - \frac{c_j}{2\epsilon_j} Q_j + \delta U_j - k_j = 0, \quad (7)$$

где

Q_{aj} — реактивная нагрузка j -ой подстанции с СД, квар;
 Q_j — реактивные нагрузки подстанций, не имеющих СД, квар;

P_{ϕ}, P — с индексами — активные мощности, квт;

q_{ϕ}, q — с индексами — потери реактивной мощности (в том числе и холостого хода) в сетях, квар;

$\delta U_{\phi}, \delta U$ — с индексами — добавки напряжения в трансформаторах с ПБВ, величина которых зависит от рабочих положений переключателей апцапф [3];

ξ_{ϕ}, ξ — с индексами — отношение активного сопротивления сети к индуктивному

$$\xi = \frac{r}{x} = \frac{c}{d}.$$

На переменные накладываются ограничения вида:

$$Q_{cij}^{\min} \leq Q_{cij} \leq Q_{cij}^{\max}, \quad (8)$$

$$Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max} \quad (9)$$

$$Q_{\phi_j}^{\min} \leq Q_{\phi_j} \leq Q_{\phi_j}^{\max} \quad (10)$$

Решение задачи оптимизации должно соответствовать условию минимума суммарных эквивалентных потерь (1) при выполнении (4) — (10). Используя метод неопределенных множителей Лагранжа, решение указанной задачи можно свести к отысканию минимума функции

$$\psi = p_{\Sigma}^2 - \sum_{j=1}^e (\lambda_j \varphi_{1j} - \lambda_{\phi_j} \varphi_{2j} - \gamma_j \varphi_{3j} - \gamma_{\phi_j} \varphi_{4j}), \quad (11)$$

где $\lambda_{\phi_j}^{j=1}$, λ_j , γ_j , γ_{ϕ_j} — некоторые постоянные, соответствующие оптимальному распределению реактивных нагрузок между источниками, квт/квар.

Оптимальные значения переменных, соответствующие минимуму (11), определяются из решения системы уравнений вида:

$$\frac{\partial \psi}{\partial Q_{\phi_1}} = a_0 Q_{\phi_1} + v_0 + a_0(q_{\phi_1} + Q_1) - \lambda_{\phi_0} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Q_{c_{ij}}} = a_{ij} Q_{c_{ij}} + v_{ij} - \lambda_j = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Q_{\phi_j}} = c_{\phi_j} Q_{\phi_j} + \lambda_{\phi_{j-1}} - \lambda_{\phi_j} - \frac{c_{\phi_j}}{2\xi_{\phi_j}} \gamma_{\phi_j} = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Q_j} = c_j Q_j + \lambda_{\phi_j} - \lambda_j - \frac{c}{2\xi_j} \gamma_j = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_{\phi_j}} = e_{\phi_j} k_{\phi_j} + f_{\phi_j} - \gamma_{\phi_j} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_j} = e_j k_j + f_j - \gamma_j = 0; \quad (17)$$

$$j = 1, 2, \dots, l$$

и уравнений (4)—(7) с учетом (8)—(10).

Как видно из (12)—(17), в основе определения оптимальных режимов возбуждения СД лежит принцип равенства удельных приростов активных потерь, зависящих от реактивной мощности и уровней напряжения:

Общий вид закона оптимального регулирования непосредственно следует из (13)

$$\alpha_{ij} = \frac{\lambda_j - v_{ij}}{v_{ij}}, \quad (18)$$

где

$\alpha_{ij} = \frac{Q_{c_{ij}}}{Q_{с.н.ij}}$ — относительное значение реактивной мощности СД i -ой группы j -ой подстанции, $o. e.$;

$$v'_{ij} = a_{ij} Q_{с.н.ij}, \text{ квт/квар.}$$

Входящий в (18) удельный прирост λ_j определяется из решения системы уравнений (13)—(17) и (4—7) может быть представлен в виде двух членов

$$\lambda_j = \lambda'_j + \Delta_j, \text{ квт/квар.} \quad (19)$$

Первый член равен

$$\lambda'_j = \lambda_{\phi_0} + 2\xi'_{\phi_1} k_{\phi_0} - \left(2\xi_j + \frac{c_j}{2\xi_j} e_j\right) k_j, \text{ квт/квар,} \quad (20)$$

где

$$\lambda_{\phi_0} = v_0 + a_0(q_{\phi_1} + Q_1), \quad (21)$$

$$\xi'_{\phi_1} = \xi_{\phi_1} + \frac{a_0}{d_{\phi_1}}, \quad (22)$$

а второй

$$\Delta_j = \Delta_{1j} - \Delta_{2j} + \Delta_{3j} - \Delta_{4j} - \Delta_{5j} \text{ квт/квар,} \quad (23)$$

где

$$\Delta_{1j} = 2 \left[\xi_j \frac{c_j}{2} P_j + \sum_{v=1}^j \xi_{\phi_v} \frac{c_{\phi_v}}{2} P_{\phi_v} \right], \quad (24)$$

$$\Delta_{2j} = 2 \left[(\xi_j - \xi_{\phi_j}) k_{\phi_j} + \sum_{v=1}^{j-1} (\xi_{\phi_{v+1}} - \xi_{\phi_v}) k_{\phi_v} \right], \quad (25)$$

$$\Delta_{3j} = 2 \left[\xi_j \cdot \delta U_j + \sum_{v=1}^j \xi_{\phi_v} \cdot \delta U_{\phi_v} \right], \quad (26)$$

$$\Delta_{4j} = \frac{c_j}{2\xi_j} f_j + \sum_{v=1}^{v=j} \frac{c_{\phi_v}}{2\xi_{\phi_v}} f_{\phi_v} + \sum_{v=1}^{v=j} \frac{c_{\phi_v}}{2\xi_{\phi_v}} e_{\phi_v} k_{\phi_v}, \quad (27)$$

$$\Delta_{5j} = c_j q_j + \sum_{v=1}^j (q_v + Q_{a,v}) e_v. \quad (28)$$

Второй член Δ_j можно рассматривать как добавку к λ'_j , которая обусловлена:

- а) активными нагрузками (составляющая Δ_{1j});
- б) неоднородностью сетей (составляющая Δ_{2j});
- в) добавками напряжения в трансформаторах с ПБВ, величина которых зависит от рабочих положений переключателей анцапф (составляющая Δ_{3j});
- г) экономической невыгодностью отклонений напряжений у электроприемников от оптимальных значений (составляющая Δ_{4j});
- д) потерями реактивной мощности в сетях и реактивными нагрузками подстанций, не имеющих СД (составляющая Δ_{5j}).

Закономерности формирования составляющих $\Delta_{1j} \div \Delta_{5j}$ определяются формулами (24) — (28). Эти закономерности, а также закономерности формирования λ'_j , определяемые формулой (20), как нетрудно показать, универсальны, т. е. справедливы для сколь угодно сложного разветвленного узла нагрузки.

Для реализации закона (18) необходима весьма сложная система автоматического регулирования с применением общих для всего узла нагрузки логических блоков, измеряющих величину добавок $\Delta_{1j} \div \Delta_{5j}$.

Предпосылки к упрощению задачи оптимизации

Предложенная выше математическая модель оптимального регулирования описывает реальный процесс с вероятной ошибкой не ниже $\pm 10\%$. Это обстоятельство дает возможность упростить решение задачи оптимизации. Основным требованием при упрощении всякой задачи является сохранение основных связей, которые определяют сущность физического или технико-экономического явления.

Для рассматриваемой задачи основные связи можно обнаружить в результате анализа исходной информации о режимах электропотребления характерными узлами нагрузки с СД. Как показывает анализ, узлы нагрузки со значительным парком СД (обогащительные фабрики, глино-

земные и шинные заводы, кислородные и компрессорные станции), где, прежде всего, имеются резервы экономии электроэнергии за счет оптимизации режимов, характеризуются равномерными графиками реактивных нагрузок и нагрузочных диаграмм СД, ритмичностью в работе и относительной близостью источников питания.

В результате режим электропотребления таких узлов нагрузки достаточно полно может характеризоваться средними показателями, такими, как средние активные и реактивные нагрузки подстанций с СД в характерных режимах, обусловленных технологией работ.

В большинстве случаев исчерпывающую информацию дает основной технологический режим, что позволяет свести решение задачи оптимизации к установке на СД некоторых постоянных базисных токов возбуждения, которые выбираются исходя из средних показателей электропотребления в основном технологическом режиме работы предприятия.

Расчеты базисных режимов сводятся к решению системы уравнений (12)—(17) и (4)—(7) с учетом ограничений (8)—(10).

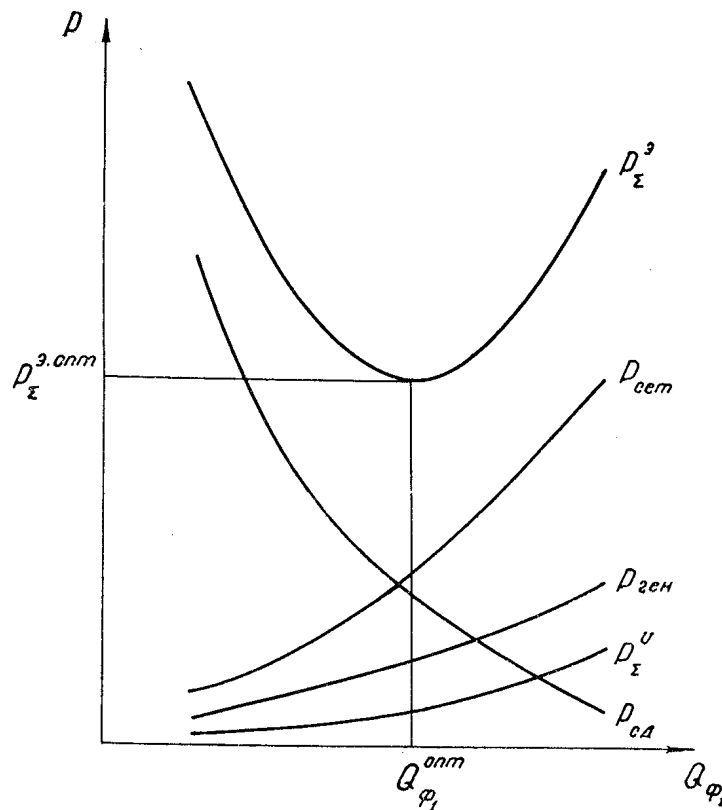


Рис. 2. К расчетам базисных режимов. $P_{сет}$ — потери в сетях, $P_{ген}$ — потери в генераторах, $P_{сд}$ — потери в СД

На рис. 2 приводятся результаты расчетов «базисных» режимов для характерного узла нагрузки, имеющего значительный парк СД. Как видно из рисунка, за счет оптимального распределения реактивных нагрузок между источниками (СД и генераторами) можно существенно сократить величину суммарных потерь ρ_{Σ}^3 в основном технологическом режиме работы предприятия. При этом всякое ограничение реактивной мощности на головном участке Q_{ϕ_1} снижает величину экономии суммарных потерь.

Как показывают расчеты на ЭЦВМ для характерных узлов нагрузки с СД [4], свыше 90% экономии потерь электроэнергии дает установка

базисных токов и только остальные 10% могут быть реализованы с помощью автоматического регулирования возбуждения СД по закону (18).

Внедрение базисных режимов без средств автоматики на ряде предприятий может оказаться невозможным по условиям устойчивой работы СД и узлов нагрузки. Кроме того, в результате установки базисных, как правило, пониженных против номинальных токов возбуждения в узле нагрузки создается резерв реактивной мощности. Без средств автоматики эффективное использование этого резерва практически невозможно, если учесть, что в узлах нагрузки сосредоточивается до 30 и более СД, а обслуживающий персонал, способный вручную ввести резерв, немногочислен [5].

Технико-экономический анализ [4] показывает, что в условиях действующих промышленных предприятий с большим парком СД экономически оправдано применение простейших средств автоматики, стоимость которых не превышает 40—80 рублей в расчете на 1 двигатель.

Весьма интересным в этой связи представляется разработка регуляторов, которые, с одной стороны, были бы недороги, а с другой — с известным приближением реализовали бы законы оптимального регулирования.

Упрощенные законы оптимального регулирования

С достаточной для практических целей точностью можно допустить, что:

1) отклонение величины добавки Δ_j в (19) от значения, соответствующего базисному режиму, не вызовет изменения оптимального значения реактивной мощности α_{ij} в (18);

2) отклонения уровня напряжения $k_{\Phi 0}$ и удельного прироста в центре питания $\lambda_{\Phi 0}$ от некоторого среднего значения отсутствуют.

Эти допущения позволяют, сохранив основные связи в объекте исследования, выразить закон оптимального регулирования в виде линейных зависимостей:

$$\alpha_{ij} = \alpha_{0,U} - \alpha_U k_j, \quad (29)$$

$$\alpha_{ij} = \alpha_{0,q} + \alpha_q Q_j, \quad (30)$$

где

$$\alpha_{0,U} = \frac{1}{\sigma'_{ij}} \left[\sigma_0 + \alpha_0 (q_{\Phi 1} + Q'_1) + 2 \left(\xi_{\Phi 1} + \frac{\alpha_0}{d_{\Phi 1}} \right) k_{\Phi 0} + \Delta_j^{\delta} - \sigma_{ij} \right], \quad (31)$$

$$\alpha_U = 2 \left(\xi_j + \frac{c_j}{2\xi_j} e_j \right) \frac{1}{\sigma'_{ij}}, \quad (32)$$

$$\alpha_{0,q} = \alpha_{0,U} - \alpha_U \left(k_{\Phi 1} - \frac{c_j}{2} P_j + \delta U_j \right)^{\delta}, \quad (33)$$

$$\alpha_q = \frac{c_j}{2\xi_j} \alpha_U \quad (34)$$

постоянные коэффициенты.

Как известно, реактивная мощность СД α_{ij} находится в весьма сложной нелинейной зависимости от следующих параметров режима: тока возбуждения, активной нагрузки и напряжения на зажимах статора. При решении задачи оптимизации на эти параметры накладывается ряд серьезных ограничений: ток возбуждения ограничивается пределами 60—100% номинального по условиям устойчивой работы и перегрева об-

моток, пределы изменения напряжения не превышают 90—110%, а активной нагрузки 50—100% номинальных значений.

В этих специфических условиях нелинейности проявляются очень слабо, что позволяет сложные зависимости реактивной мощности от параметров режима аппроксимировать линейными характеристиками вида [6]

$$\alpha = h_i i - h_\beta \beta - h_k k - h_0, \quad (35)$$

где

α, i, β, k — относительные значения реактивной мощности, тока возбуждения, активной нагрузки и напряжения статора соответственно;

h_i, h_β, h_k, h_0 — некоторые постоянные коэффициенты.

Для электроприводов, характеризующихся малым изменением момента на валу двигателя, вполне можно допустить, что отклонение активной нагрузки β от среднего значения не вызовет заметного изменения тока возбуждения.

Эти допущения позволяют выразить законы (29) и (30) через ток возбуждения СД:

$$i_{ij} = i_{o,U} - i_U k_j, \quad (36)$$

$$i_{ij} = i_{o,q} + i_q Q_j, \quad (37)$$

где

$$i_{o,U} = \frac{\alpha_{o,U} + h_0 + h_\beta \beta}{h_i}, \quad (38)$$

$$i_U = \frac{\alpha_U - h_k}{h_i}, \quad (39)$$

$$i_{o,q} = i_{o,U} - i_U \left(k_{\phi j} - \frac{c_j}{2} P_j + \delta U_j \right)^\delta, \quad (40)$$

$$i_q = \frac{c_j}{2 \xi_j} i_U - \text{постоянные коэффициенты.} \quad (41)$$

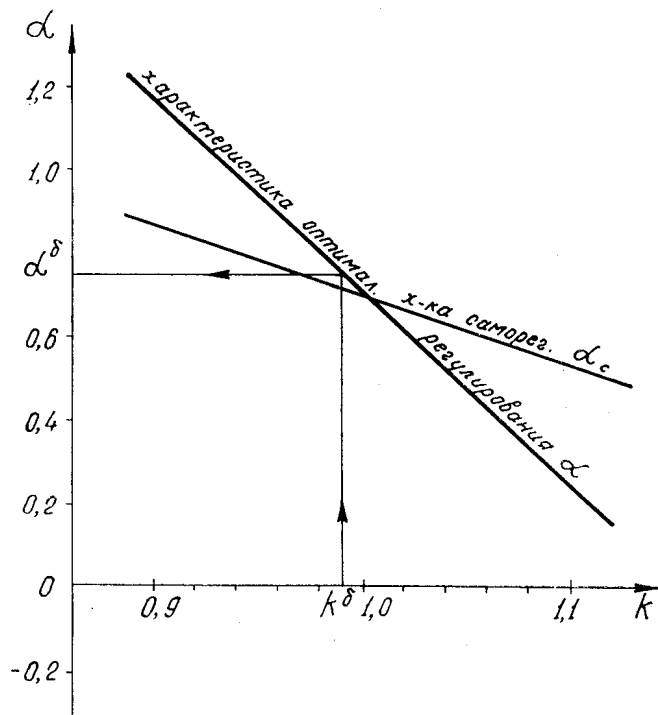


Рис. 3. Упрощенные линейные законы регулирования

Упрощенные законы оптимального регулирования (29), (30) и (36), (37) предполагают увеличение выработки реактивной мощности СД при снижении напряжения статора (рис. 3), что может быть осуществлено в общем случае соответствующим регулированием тока возбуждения.

Отличительной особенностью СД с $OK3 > 1$ является способность к увеличению выработки реактивной мощности при снижении напряжения без искусственного увеличения тока возбуждения, так называемый эффект саморегулирования.

С некоторым приближением закон саморегулирования можно представить в виде

$$\alpha_{c_{ij}} = \alpha_{o.U} - (\alpha_U - h_k) - h_k k. \quad (42)$$

При одинаковой жесткости линейных характеристик (29) и (42), т. е. при равенстве

$$\alpha_U = h_k \quad (43)$$

реализация оптимального закона не потребует автоматического регулирования. Во всех других случаях требуется автоматическое регулирование тока возбуждения, усиливающее эффект саморегулирования.

Подстановкой в (43) значения α_U из (32) можно получить расчетную формулу для определения критического значения отношения $\frac{r_j}{x_j} = \xi_j$, при котором применять автоматическое регулирование не следует,

$$\xi_{jkp} = \frac{h_k b'_{ij}}{4} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(h_k b'_{ij})^2 - c_j e_j}. \quad (44)$$

В случае $\xi_j \geq \xi_{jkp}$ оптимальным условиям удовлетворяет закон саморегулирования СД.

Реализация упрощенных законов оптимального регулирования может быть осуществлена линейными регуляторами (ЛР) реактивной мощности (законы 29, 30) или значительно более простыми ЛР тока возбуждения (законы 36, 37).

Параметрами регулирования могут быть напряжение на зажимах статора, если в узле нагрузки нет трансформаторов с РПН (законы 29, 36) или реактивная мощность питающего подстанции фидера, если в узле нагрузки есть трансформаторы с РПН (законы 30, 37). Для СД с $OK3 > 1$ оптимальным условиям в ряде случаев удовлетворяет закон саморегулирования (43).

О практических методах решения задачи оптимизации

Решение задачи оптимального использования компенсирующей способности СД на действующих промышленных предприятиях в силу изложенных выше специфических особенностей целесообразно разбить на два этапа.

Первый этап связан с расчетами и установкой на СД базисных токов возбуждения. Второй — предполагает внедрение на СД простейших линейных регуляторов, реализующих упрощенные законы оптимального регулирования.

При практических расчетах базисных токов в расчете установок регуляторов вполне оправдано пренебрежение в функции суммарных потерь (1) составляющей p_{Σ}^U [7].

Практический метод расчета базисных токов изложен в [8]. Расчеты уставок регуляторов выполняются последовательно по формулам

(31) — (34) и (38), (41) после того, как произведены расчеты базисных токов и определены добавки Δ_j^{δ} .

Целесообразность внедрения автоматического регулирования можно проверить по простой формуле

$$\xi_j \leq \xi_{jкр} = \frac{h_k e'}{2},$$

которая получается из (44), если принять $e=0$.

Результаты производственных экспериментов по внедрению базисных токов и опытные испытания линейных регуляторов на действующих промышленных предприятиях подтверждают технико-экономические предпосылки, заложенные в основу расчетов оптимальных режимов.

Статистическая обработка результатов внедрения оптимальных режимов на предприятиях цветной металлургии позволила выявить, что среднее значение экономии потерь электроэнергии за счет оптимального использования компенсирующей способности СД оценивается в 0,5% от общего потребления электроэнергии узлом нагрузки. На базе проведенных исследований разработаны «Методические указания по оптимизации режимов» [9].

«Указания» согласованы в Госэнергонadzоре и циркулярным письмом Минцветмета рекомендованы энергетикам предприятий цветной металлургии в качестве руководства по оптимальному использованию компенсирующей способности СД в условиях эксплуатации. «Указания» с успехом могут быть использованы на других объектах, оснащенных значительным парком СД: обогатительные фабрики черной металлургии, шинные и другие заводы химической промышленности, кислородные и компрессорные станции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Солдаткина. О количественной оценке качества напряжения в распределительных сетях. «Электрические станции», 1963, № 9.
2. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. Госэнергоиздат, 1963.
3. Н. А. Мельников, Л. А. Солдаткина. Регулирование напряжения в электрических сетях. Изд. «Энергия», М., 1968.
4. В. В. Архипенко, В. А. Трошин. Об оптимальном регулировании режима возбуждения синхронных двигателей на горнообогатительных предприятиях. Доклады к шестой научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Томск, 1969.
5. Р. А. Свирский. Проблемы совершенствования режимов работы электрооборудования горнообогатительного комбината. «Промышленная энергетика», 1968, № 11.
6. В. В. Архипенко. Определение коэффициентов линейной аппроксимации зависимости реактивной мощности синхронного двигателя от параметров режима. Сб. материалов к Всесоюзному совещанию. «Цветметинформация», 1970.
7. Ю. М. Тюханов, В. В. Архипенко. Определение области экономической устойчивости функции расчетных затрат, зависящих от уровня напряжения на горнообогатительных предприятиях. Сб. Регулирование напряжения в электрических сетях. «Энергия», 1968.
8. В. В. Архипенко, В. А. Трошин. Практический метод расчета режимов возбуждения синхронных двигателей. «Электричество», 1969, № 10.
9. Методические указания по оптимизации режимов возбуждения синхронных двигателей на действующих предприятиях цветной металлургии. Минцветмет СССР, М., 1969.