

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316. 621.313

Е.К.Ещин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

Проблема компенсации реактивной мощности (КРМ) остается одной из важнейших при эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) с электродвигательной нагрузкой в виде асинхронных электродвигателей (АД) из-за продолжающегося роста мощностей используемых в приводах АД и цен на электроэнергию [1,2]. Ясно, что она напрямую связана с проблемой энергосбережения, т.к. около 60% всей реактивной мощности, связанной с образованием переменных магнитных полей, потребляют АД.

Особого внимания заслуживает проблема КРМ в СЭС, где существенно влияние изменения состояния одного электродвигателя на состояние остальных (например, см. рис.1).



Рис.1 Последовательный пуск АД АВР280L4 в СЭС по рис.3.

В этой связи представляет интерес разработка расчетных процедур оценки необходимых величин компенсирующих емкостей в варианте индивидуальной КРМ АД, находящихся в общей системе электроснабжения.

В [3] рассмотрено моделирование процессов электрохимического преобразования энергии в СЭС произвольной структуры (рис.2). Обозначения на рисунке: индекс 0 – соответствует общему участку питающего кабеля. Для остальных кабелей первый индекс означает принадлежность уровню, второй – ветви соответствующего уровня.

Диапазон изменения значений уровней $k \in (1, M)$, диапазон изменения индексов ветвей $v \in (1, 2^k)$. При помощи такой системы индексации будем идентифицировать конкретные кабельные участки (ветви) системы электроснабжения. Например, L_{kv} , R_{kv} – индуктивность и активное сопротивление кабельного участка k -го уровня, v -ой ветви, являющиеся функциями его длины.

Там же [3] получена математическая модель асинхронного электродвигателя, работающего в этой сети без учета возможных емкостей, присоединенных к статорам электродвигателей.

Состояние каждого j -го двигателя, работающего в одиночном варианте, обычно [4] описывается совокупностью дифференциальных и алгебраических связей (1):

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha j} &= U_{s\alpha j} - R_{sj} I_{s\alpha j}, & I_{s\alpha j} &= \frac{\Psi_{s\alpha j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} \Psi_{r\alpha j}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta j} &= U_{s\beta j} - R_{sj} I_{s\beta j}, & I_{s\beta j} &= \frac{\Psi_{s\beta j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} \Psi_{r\beta j}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha j} &= -R_{rj} I_{r\alpha j} - p_j \omega_j \Psi_{r\beta j} = f_j^3, & I_{r\alpha j} &= \frac{\Psi_{r\alpha j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj}}{L'_{rj}} \Psi_{s\alpha j},
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\beta} = -R_{rj} I_{r\beta} + p_j \omega_j \Psi_{r\alpha} = f_j^4, \quad I_{r\beta} = \frac{\Psi_{r\beta}}{L'_{rj}} - \frac{k_{\beta j}}{L'_{rj}} \Psi_{s\beta},$$

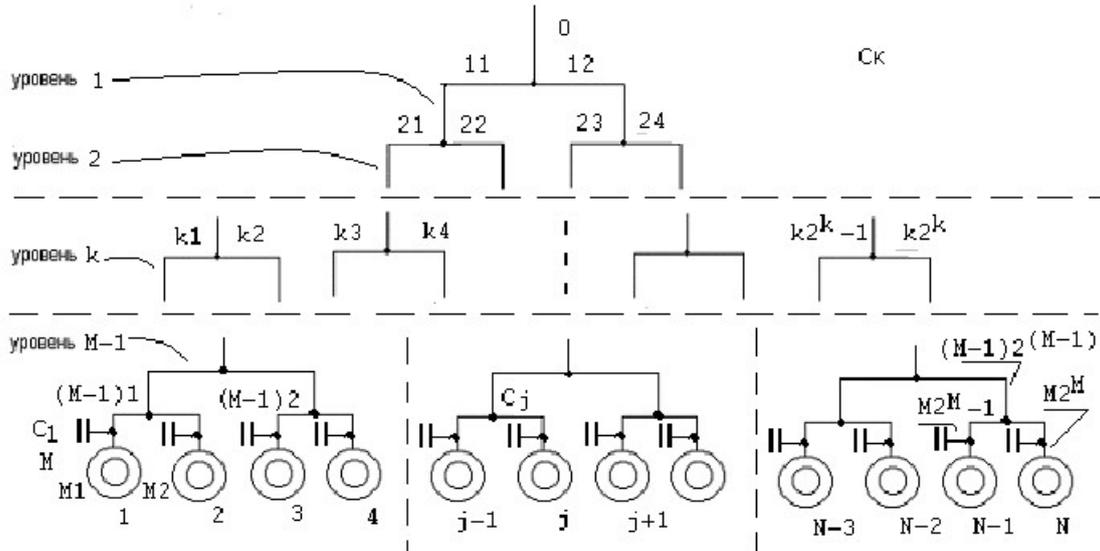


Рис.2 Общая структура системы электроснабжения с электродвигательной нагрузкой

Здесь параметры, начинающиеся с R и индексами s, r – активные сопротивления обмоток статоров и роторов АД, p_j – число пар полюсов, ω_j – геометрическая угловая скорость вращения ротора электродвигателя, Ψ_s, Ψ_r и I_s, I_r с индексами α, β – составляющие потокосцеплений и токов статора и ротора по осям неподвижной системы координат, k, L' – с индексами s, r, j коэффициенты электромагнитной связи и переходные индуктивности двигателей, j – в индексном обозначении определяет номер двигателя.

Ясно, что состояние каждого j -го электродвигателя по рис.2 определяется скоростью вращения ротора ω_j и – составляющими $U_{s\alpha j}, U_{s\beta j}$ по (1) напряжений статоров двигателей.

В этой связи рассмотрим алгоритм формирования упомянутых напряжений в системе электроснабжения по рис.2 с целью синтеза математической модели j -го асинхронного электродвигателя. В отличие от [3] будем производить учет компенсирующих емкостей – $C_j, j \in (1, M)$ на рис.2.

$$l_0 = 1 + \text{int} \left(\frac{j}{2^{m-k}} \right) 2^{m-k}, \quad l_1 = \text{int} \left(\frac{j}{2^{m-k}} \right) 2^{m-k} + 2^{m-k}, \quad v = 1 + \text{int} \left(\frac{j}{2^{m-k}} \right) \quad (2)$$

Основная идея при определении напряжений на обмотках статора j -го электродвигателя – идентификация путей от двигателей до источника питания и идентификация диапазонов номеров двигателей, токи которых участвуют в формировании суммарных падений напряжений на каждом кабельном отрезке – ветви при помощи аналитических конструкций (2), где l_0, l_1 – начальное и конечное значения индекса, определяющего номер двигателя, токи которого участвуют в формировании падения напряжения на k, v –участке кабельной сети.

С учетом последнего, искомое напряжение на обмотке статора j -го электродвигателя (для составляющей по координатной оси α)¹:

$$U_{s\alpha j} = U_\alpha - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=l_0}^{l_1} (I_{s\alpha i} + I_{c\alpha i}) \right) + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} (I_{s\alpha i} + I_{c\alpha i}) \right), \quad U_{s\alpha j} = \frac{1}{C_j} \int I_{c\alpha j} dt$$

Здесь $I_{c\alpha i}$ – емкостная составляющая тока статора. Учитывая, что последнее выражение можно переписать следующим образом:

$$U_{s\alpha j} = U_\alpha - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \frac{d}{dt} I_{s\alpha i} + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} I_{s\alpha i} + L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{d^2 U_{s\alpha i}}{dt^2} + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{d U_{s\alpha i}}{dt} \right),$$

где C_j – компенсирующая емкость фазы обмотки статора i -го АД), из (1) следует, что

¹Для составляющей напряжения по оси β записи аналогичны.

$$\frac{dI_{s\alpha i}}{dt} = \frac{1}{L'_{si}} \left(U_{s\alpha i} - R_{si} \left(\frac{\Psi_{s\alpha i}}{L'_{si}} - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} \Psi_{r\alpha i} \right) \right) - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} f_i^3$$

и тогда для составляющей напряжения статора АД пишем

$$U_{s\alpha j} = U_{\alpha} - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \left(\frac{1}{L'_{si}} \left(U_{s\alpha i} - R_{si} \left(\frac{\Psi_{s\alpha i}}{L'_{si}} - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} \Psi_{r\alpha i} \right) \right) - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} f_i^3 \right) + \right. \\ \left. + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} I_{s\alpha i} + L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{d^2 U_{s\alpha i}}{dt^2} + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{dU_{s\alpha i}}{dt} \right)$$

Дальнейшие преобразования дают

$$\sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{d^2 U_{s\alpha i}}{dt^2} + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{dU_{s\alpha i}}{dt} \right) = U_{\alpha} - \sum_{k=0}^m L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \frac{1}{L'_{si}} U_{s\alpha i} - U_{s\alpha j} - \\ - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \left(\frac{1}{L'_{si}} \left(R_{si} \left(-\frac{\Psi_{s\alpha i}}{L'_{si}} + \frac{k_{ri}}{L'_{si}} \Psi_{r\alpha i} \right) \right) - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} f_i^3 \right) \right) - \sum_{k=0}^m \left(R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} I_{s\alpha i} \right)$$

Обозначив $\frac{dU_{s\alpha i}}{dt} = Z_i$, в итоге получим совокупность алгебраических и дифференциальных свя-

зей, описывающих состояние j -го асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в общей системе электроснабжения.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{s\alpha j} = \frac{\Psi_{s\alpha j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} \Psi_{r\alpha j}, \quad I_{s\beta j} = \frac{\Psi_{s\beta j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} \Psi_{r\beta j}, \\ I_{r\alpha j} = \frac{\Psi_{r\alpha j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj}}{L'_{rj}} \Psi_{s\alpha j}, \quad I_{r\beta j} = \frac{\Psi_{r\beta j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj}}{L'_{rj}} \Psi_{s\beta j}, \\ f_j^3 = -R_{rj} I_{r\alpha j} - p_j \omega_j \Psi_{r\beta j}, \quad f_j^4 = -R_{rj} I_{r\beta j} + p_j \omega_j \Psi_{r\alpha j} \\ \sum_{k=0}^m L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{dZ_{\alpha i}}{dt} = U_{\alpha} - U_{s\alpha j} - \sum_{k=0}^m R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i Z_{\alpha i} - \\ - \sum_{k=0}^m L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \frac{1}{L'_{si}} U_{s\alpha i} - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \left(-\frac{R_{si}}{L'_{si}} I_{s\alpha i} - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} f_i^3 \right) \right) - \sum_{k=0}^m \left(R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} I_{s\alpha i} \right), \\ \sum_{k=0}^m L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i \frac{dZ_{\beta i}}{dt} = U_{\beta} - U_{s\beta j} - \sum_{k=0}^m R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} C_i Z_{\beta i} - \\ - \sum_{k=0}^m L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \frac{1}{L'_{si}} U_{s\beta i} - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} \left(-\frac{R_{si}}{L'_{si}} I_{s\beta i} - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} f_i^4 \right) \right) - \sum_{k=0}^m \left(R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} I_{s\beta i} \right), \\ \frac{dU_{s\alpha j}}{dt} = Z_{\alpha j}, \quad \frac{dU_{s\beta j}}{dt} = Z_{\beta j}, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha j} = U_{s\alpha j} - R_{sj} I_{s\alpha j}, \quad \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta j} = U_{s\beta j} - R_{sj} I_{s\beta j}, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha j} = f_j^3, \quad \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta j} = f_j^4, \end{array} \right.$$

где $j \in (1, M)$.

Для использования в расчетной практике полученной математической модели электромеханического преобразования энергии с возможностью КРМ совокупностью N асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, находящихся в системе электропитания произвольной структуры разработано соответствующее программное обеспечение, которое позволяет задавать конфигурацию системы электропитания, длины и параметры ветвей кабелей, количество электродвигателей, параметры электродвигателей, последовательности включения или отключения электродвигателей для имитации реальных процессов пусков и отключений приводов машин, характера нагрузки на электродвигателях при моделировании режимов работы реальных машин и величины емкостей устройств КРМ.

Пример. На рис. 1 приведены результаты расчетных осциллограмм изменений электромагнитных моментов при последовательном пуске трех асинхронных электродвигателей АВР280L4 номинальной мощностью 160 кВт, подключенных к источнику питания в соответствии с рис. 3.

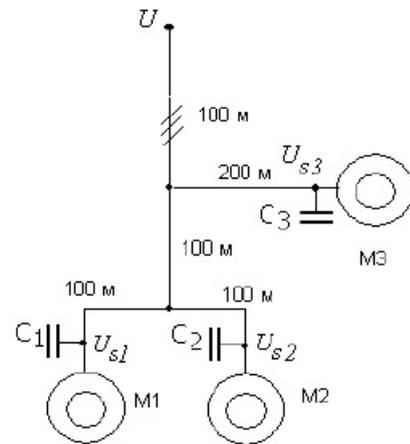
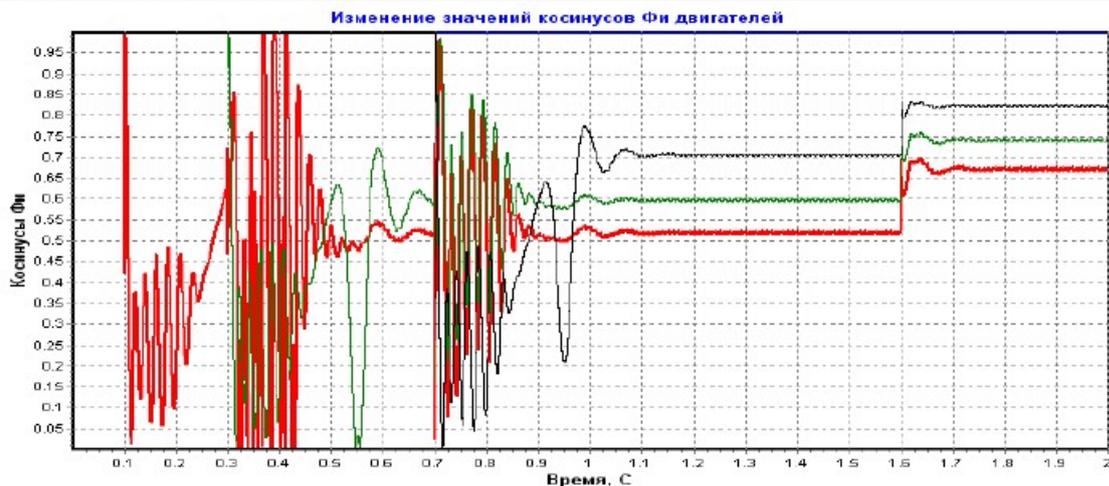


Рис.3 Расчетная схема к примеру

Временные интервалы включения двигателей уменьшены с целью иллюстрации влияния изменений в режиме работы каждого из них на состояние остальных. Пуски производились до уровней установившихся значений моментов сопротивлений на валах электродвигателей соответственно $M_{c1}=1000\text{Нм}$, $M_{c2}=1250\text{Нм}$, $M_{c3}=1500\text{Нм}$. Включение КРМ происходило через 1.6с после пуска первого АД. Величины компенсирующих емкостей принимались одинаковыми – 72.2 мкФ.

Значения косинусов φ вычислялись как значения косинусов углов между мгновенными значениями векторов напряжений и токов электродвигателей.



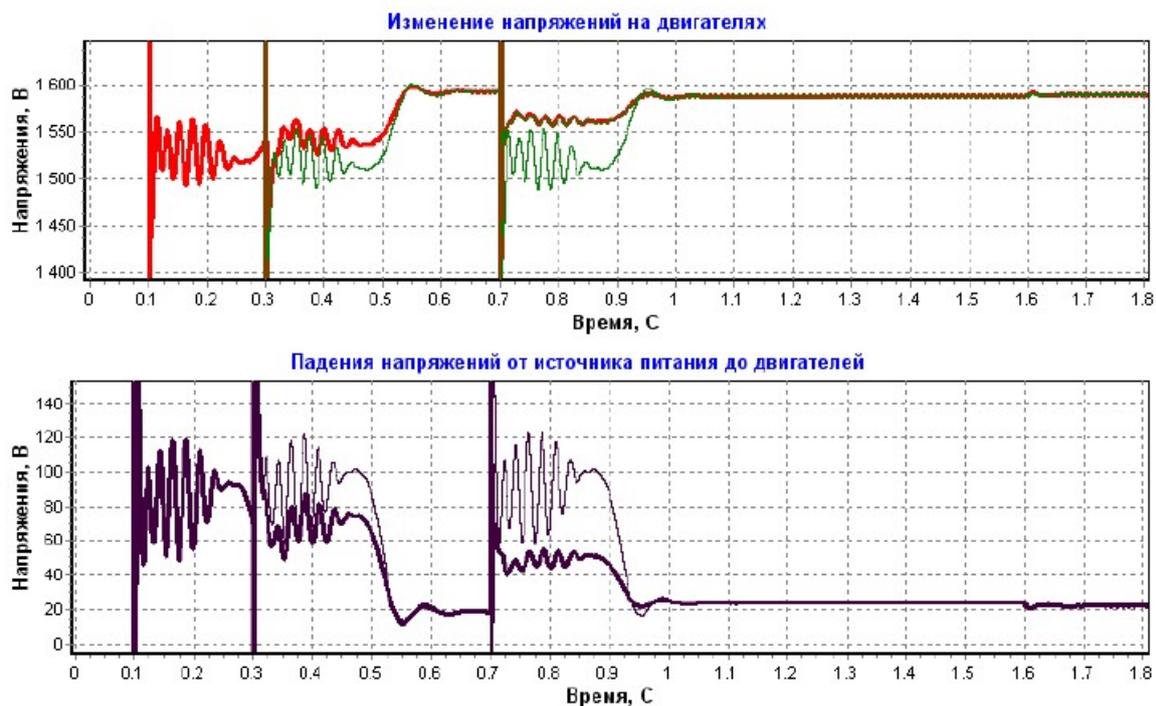


Рис.4. Пример. Сверху вниз: Характер изменения величин косинусов φ при пусках АД и включении КРМ при: одинаковых величинах емкостей (72.2 мкФ); обеспечении одинаковых значений $\cos(\varphi)=0.833$ АД. Характер изменения напряжений на АД и падения напряжений в кабельных сетях от источника питания до двигателей.

В результате применения КРМ величина тока в общем участке кабельной сети уменьшилась (амплитудные значения) с 420А до 318А. Потребляемая мощность из сети при этом уменьшилась с 680 кВт до 510 кВт.

При обеспечении всем АД номинального для этих двигателей значения $\cos(\varphi)=0.833$ потребляемая мощность из сети уменьшилась с 680 кВт до 430 кВт при значениях компенсирующих емкостей соответственно для М1 – $C1=129$ мкФ, М2 – $C2=110.6$ мкФ, М3- $C3=76.8$ мкФ.

Таким образом, на основе предложенной математической модели возможно получение необходимой информации о состоянии электромеханических систем при преобразовании электрической энергии в системе электроснабжения произвольной структуры с электродвигательной нагрузкой в виде АД и, в том числе, с применением КРМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсейчук Г. Компенсация реактивной мощности, к вопросу о технико-экономической целесообразности / Овсейчук Г. [и др.] // Новости электротехники: информационно – справочное издание.- 2008. -№4(52) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/52/08.php>. - (Дата обращения: 10.01.2012).
2. Dixon J. Reactive Power Compensation Technologies, State – of – the Art Review / Dixon J. [and others], [Электронный ресурс]. - Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. - Режим доступа: <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/32.pdf>. - (Дата обращения: 10.01.2012).
3. Ещин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в системе электроснабжения // Электротехника. – 2002. -№1. С.40-43.
4. Ковач К., Рау И. Переходные процессы в машинах переменного тока. -М. -Л.: Госэнергоиздат, 1963. -744 с.

□ Автор статьи:

Ещин
Евгений Константинович,
докт. техн. наук, проф. каф. прикладных
информационных технологий КузГТУ.
Email: eke@kuzstu.ru