

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 622:621.313-83

Е.К.Ещин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

В системах электроснабжения горных предприятий продолжается интенсивный рост мощностей используемых в приводах горных машин электродвигателей. К сожалению, вместе с тем отмечен и сопутствующий рост аварийности этих электродвигателей как отечественного, так и зарубежного производства. Превалирует аварийность статоров. Так, выполненные НИИ Взрывозащищенных Электрических Машин (НИИ ВЭМ, г.Кемерово) обследования поступивших в ремонт асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АД) показали, что из 266 электродвигателей 203 имели повреждения в статоре. Многие исследователи, например [1,2,3], сходятся во мнении, что одной из причин высокой аварийности статорных обмоток АД является высокий уровень перенапряжений, возникающих во время пусков и, особенно, при отключениях нагруженных электродвигателей. Такие случаи отключений часто наблюдаются при неудачных попытках запуска электроприводов, например, загруженных скребковых конвейеров. Величины этих перенапряжений могут превышать номинальный уровень питающего напряжения в несколько раз и представлять серьезную угрозу целостности изоляции обмоток статоров АД.

В этой связи представляет интерес разработка расчетных процедур оценки величин перенапряжений на обмотках АД, находящихся в общей системе электроснабжения для режимов их пуска и отключения. При этом особый интерес вызывает возможность оценки влияния перенапряжений, инициированных включением одного двигателя на статорные обмотки

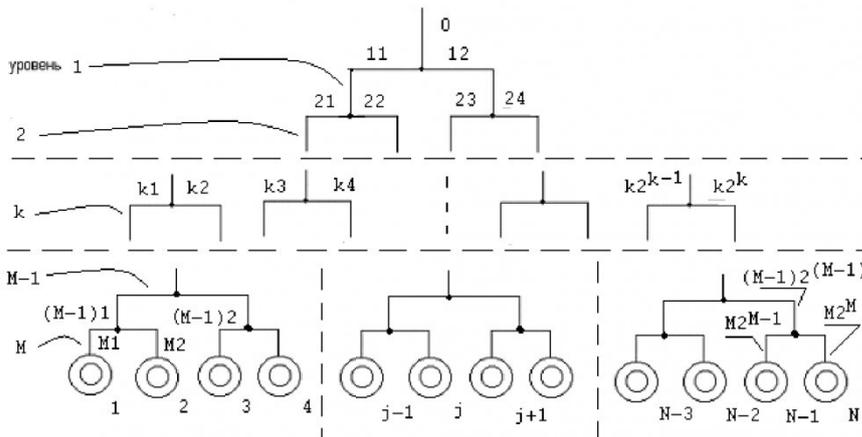


Рис1. Общая структура системы электроснабжения с электродвигательной нагрузкой

остальных электродвигателей.

В [4] рассмотрено моделирование процессов электро-механического преобразования энергии в системе электроснабжения произвольной структуры (рис.1). Там же получена математическая модель асинхронного электродвигателя, работающего в этой сети.

Обозначения на рисунке: индекс 0 – соответствует общему участку питающего кабеля. Для остальных кабелей первый индекс означает принадлежность уровню, второй – ветви соответствующего уровня. Диа-

$$\begin{cases}
 \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha j} = U_{s\alpha j} - R_{sj} I_{s\alpha j}, & I_{s\alpha j} = \frac{\Psi_{s\alpha j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} \Psi_{r\alpha j}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta j} = U_{s\beta j} - R_{sj} I_{s\beta j}, & I_{s\beta j} = \frac{\Psi_{s\beta j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} \Psi_{r\beta j}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha j} = -R_{rj} I_{r\alpha j} - p_j \omega_j \Psi_{r\beta j} = f_j^3, & I_{r\alpha j} = \frac{\Psi_{r\alpha j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj}}{L'_{rj}} \Psi_{s\alpha j}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta j} = -R_{rj} I_{r\beta j} + p_j \omega_j \Psi_{r\alpha j} = f_j^4, & I_{r\beta j} = \frac{\Psi_{r\beta j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj}}{L'_{rj}} \Psi_{s\beta j},
 \end{cases} \quad (1)$$

пазон изменения значений уровней $k \in (I, M)$, диапазон изменения индексов ветвей $v \in (I, 2^k)$. 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 -й ветви, являющиеся функциями его длины.

Состояние каждого j -го двигателя, работающего в **одиночном** варианте, обычно [5] описывается совокупностью дифференциальных и алгебраических связей (1). 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 потокоцеплений и токов статора и ротора по осям неподвижной системы координат, k, L' - с индексами sj, rj коэффициенты электромагнитной связи и переходные индуктивности двигателей, j - в индексном обозначении определяет номер двигателя.

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

В этой связи рассмотрим алгоритм формирования упомянутых напряжений в системе электроснабжения по рис.1 с целью синтеза математической модели j -го асинхронного электродвигателя. В отличие от [4,5] будем производить учет эквивалентных емкостей обмоток статоров.

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, искомого напряжения на обмотке статора j -го электродвигателя (для составляющей по координатной оси α)¹ будем иметь в виде:

$$U_{saj} = U_\alpha - \sum_{k=0}^m \left(L_{kv} \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=l_0}^{l_1} (I_{sai} + I_{cai}) \right) + R_{kv} \sum_{i=l_0}^{l_1} (I_{sai} + I_{cai}) \right).$$

Здесь I_{cai} - емкостная составляющая тока статора. Учитывая, что

$$U_{saj} = \frac{1}{C_j} \int I_{caj} dt,$$

последнее выражение можно переписать следующим образом:

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

где C_j - эквивалентная емкость фазы обмотки статора i -го АД).

Из (1) следует, что $\frac{dI_{sai}}{dt} = \frac{1}{L'_{si}} \left(U_{sai} - R_{si} \left(\frac{\Psi_{sai}}{L'_{si}} - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} \Psi_{rai} \right) \right) - \frac{k_{ri}}{L'_{si}} f_i^3$ и тогда для составляющей напряжения статора АД пишем

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

Дальнейшие преобразования дают

¹Для составляющей напряжения по оси β -записи аналогичны.

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

Вводя обозначения $\frac{dU_{sai}}{dt} = Z_i$, в итоге получим совокупность алгебраических и дифференциальных связей, описывающих состояние j -го асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в общей системе электроснабжения:

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

где $j \in (1, N)$.

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

Пример. На рис.3 приведены результаты исследования процессов последовательного пуска и отключения трех асинхронных электродвигателей АВР280L4 мощностью 160 кВт, подключенных

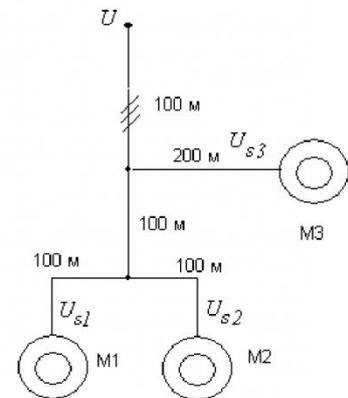


Рис.2. Расчетная схема к примеру

к источнику питания в соответствии с рис.2. Временные интервалы включения двигателей уменьшены с целью проиллюстрировать влияние изменений в режиме работы каждого из них на состояние остальных.

Из расчетных осциллограмм пусков и отключений АД (рис.3) видно, что пуск каждого электродвигателя сопровождается возникновением величин перенапряжений, кратных двум от уровня амплитуды питающего напряжения.

Импульс перенапряжения, инициированный запускаемым электродвигателем, распространяется по кабельной сети и обеспечивает появление перенапряжений на уже работающих АД. Естественно, что величины этих перенапряжений зависят от удаленности электродвигателей друг от друга в системе электроснабжения.

Наибольшую опасность для изоляции обмоток статоров представляют перенапряжения, возникающие при отключениях двигателей, работающих с большими нагрузочными токами.

Таким образом, на основе использования математической модели возможно получение необходимой информации о состоянии электромеханических систем при преобразовании электрической энергии в системе электроснабжения произвольной структуры и, в том числе, о величинах возникающих при этом перенапряжений.

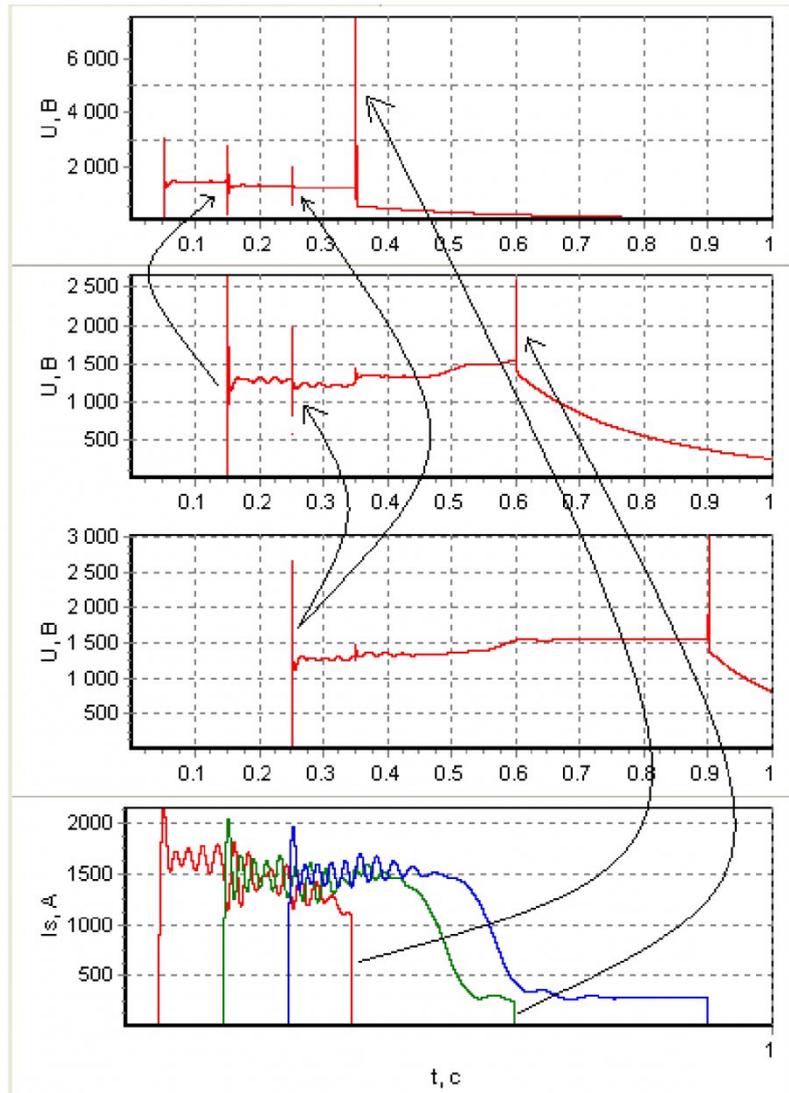


Рис.3. Пример. Характер изменения амплитуд векторов фазных напряжений и токов статоров АД при пусках и отключениях и влияние изменений в режиме работы каждого электродвигателя на состояние остальных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 204. -368 с.
2. Трегубов С.В., Пантелеев В.А., Фрезе О.Г. Общие принципы выбора варисторов для защиты от импульсных напряжений // <http://www.komi.com/progress/product/varistor/manual/>
3. Шмаков А.В., Рахимов Д.М. Защита от перенапряжений высоковольтного оборудования, коммутируемого вакуумными выключателями. http://www.enprom.ru/enprom8_39.html
4. Ещин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в системе электроснабжения // Электротехника. – 2002. -№1. с.40-43.
5. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. -М. -Л.: Госэнергоиздат,1963. -744 с.

□ Автор статьи :

Ещин
Евгений Константинович
- докт.техн.наук, проф., зав.каф.
вычислительной техники и инфор-
мационных технологий