

УДК 621.311.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.П. Косогоров, С.А. Машеевский, А.С. Шеломенцев
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

При нормальном функционировании электрических систем практически всегда возникают рабочие переходные процессы, обусловленные некоторыми возмущающими воздействиями, например, включением и отключением элементов электрической сети, изменением мощности нагрузок тех или иных потребителей, которые в той или иной мере отражаются на режиме работы системы.

Важнейшими характеристиками нагрузок потребителей электроэнергии являются значения их активных и реактивных мощностей, которые зависят от напряжения и частоты в электроэнергетической системе.

Статические характеристики нагрузки по напряжению или по частоте – это зависимости активной и реактивной мощностей от напряжения или частоты при медленных изменениях параметров режима, при которых каждое их значение соответствует некоторому установившемуся режиму.

Динамические характеристики нагрузки по напряжению или по частоте – это зависимости активной и реактивной мощностей от напряжения или частоты при быстрых изменениях параметров режима, т.е. характеристики переходных режимов, учитывающие скорости изменения их параметров [1].

При расчетах динамической устойчивости нагрузки нередко учитывают статическими характеристиками, так как они лучше известны, чем какие-либо другие параметры. Однако применение статических характеристик в расчетах переходных процессов для резких возмущений в энергосистеме приводит к заметным погрешностям, так как зависимости активной и реактивной мощности от напряжения в этом случае иные, чем в установившемся режиме [1, 2].

С точки зрения влияния нагрузок на демпфирование переходных процессов в энергосистеме интерес представляют их динамические характеристики, проявляющиеся в процессе синхронных качаний. Существенно меньшие инерционные постоянные двигателей по сравнению с инерционными постоянными энергоблоками дают основание предполагать, что динамические характеристики нагрузок в процессе низкочастотных электромеханических качаний, характерных для протяженных энергообъединений, будут весьма близки к их статическим характеристикам. Это предположение было подтверждено серией расчетов электромеханических переходных процессов, в одних из которых часть нагрузки была представлена асинхронными двигателями с учетом их уравнений движения,

в других расчетах - регулирующие эффекты нагрузки по частоте отображались статическими характеристиками [3].

Исследованию характеристик нагрузок энергосистем посвящено значительное количество работ, где отмечается, что их характеристики оказывают определяющее влияние на статические и динамические режимы энергосистем. Однако моделирование нагрузки связано с определенными трудностями, обусловленными большим разнообразием электроприемников, полная информация по составу и параметрам которых для каждого конкретного узла энергосистемы, как правило, отсутствует [1, 2, 3].

Нагрузки электрических систем, представляющие собой комплексы многочисленных потребителей электроэнергии, обычно обладают значительными мощностями и различными статическими и динамическими характеристиками. Происходящие в комплексных нагрузках переходные процессы, оказывают существенное влияние на режимы работы электроэнергетических систем.

В зависимости от особенностей решаемой задачи, при расчетах режимов работы энергосистем, нагрузка может быть представлена различными расчетными моделями. В общем случае нагрузка того или иного узла энергосистемы может быть представлена как комплексная расчетная модель, которая позволяет воспроизвести при расчетах основные особенности переходных процессов, как в энергосистемах, так и в системах электроснабжения в частности.

В большинстве случаев комплексный узел нагрузки может быть представлен типовыми элементами - эквивалентными синхронным и асинхронным двигателями и статической нагрузкой. Однако не исключены и случаи представления нагрузки иным количеством элементов, обеспечивающих более детальный учет основных особенностей, как потребителей, так и распределительной электрической сети.

В зависимости от решаемой задачи, структуры, и мощности нагрузки расчетная схема нагрузки может содержать различное количество узлов, синхронных и асинхронных двигателей и других потребителей. Чем меньше протяженность распределительной сети и чем более однородна нагрузка, тем проще может быть расчетная модель узла нагрузки. Иногда многоэлементные комплексные расчетные модели нагрузок используются для крупных промышленных предприятий, которые потребляют мощность, соизмеримую с мощностью электростанций.

Комплексная расчетная модель нагрузки представляется, как многоэлементная модель должна содержать уравнения обобщенной электрической машины, моделирующие эквивалентный асинхронный двигатель и эквивалентный синхронный двигатель и уравнения статической нагрузки. В понятие статической нагрузки включаются все потребители

электроэнергии, кроме электродвигателей: электропечи, освещение, значительная часть коммунально-бытовой нагрузки и т. п. Кроме того, к статической нагрузке относят конденсаторные батареи, емкости воздушных и кабельных линий [3, 4].

В связи со значительными различиями структуры нагрузок, а также различиями их статических и динамических характеристик, при детальном учете двигательной и статической нагрузок в многоэлементной комплексной модели возникает необходимость выделения, так называемых резкопеременных (ударных) нагрузок, к которым относят электроприводы различных прокатных станков, электродуговые сталеплавильные печи и др. [4].

Уравнения состояния элементов комплексной модели нагрузок, как правило, должны быть составлены в соответствии с требованиями их согласования на уровне входных и выходных воздействий, т. е. все уравнения элементов рассматриваемых нагрузок необходимо привести к виду, где на вход модели подается напряжение источника питания, а на ее выходе снимается ток нагрузки в той же системе координатных осей.

При анализе переходных и установившихся процессов в электрических системах обычно пользуются уравнениями состояния, записанными в какой-либо из применяемых ортогональных систем координатных осей.

Анализ систем координатных осей [4], в которых могут быть представлены уравнения элементов комплексной нагрузки, показывает, что они принимают наиболее простую форму в системе вращающихся координатных осей d_s , q_s , связанных с вектором напряжения узла нагрузки. Кроме того, представляется целесообразным совмещение положительного направления оси q_s с направлением вектора напряжения в узле электрической сети. В принятой системе координатных осей - ось q_s принята за действительную, а ось d_s принята за мнимую (рис. 1). В этом случае, проекции токов элементов комплексной модели имеют реальный физический смысл, т.е. равны активному и реактивному токам.

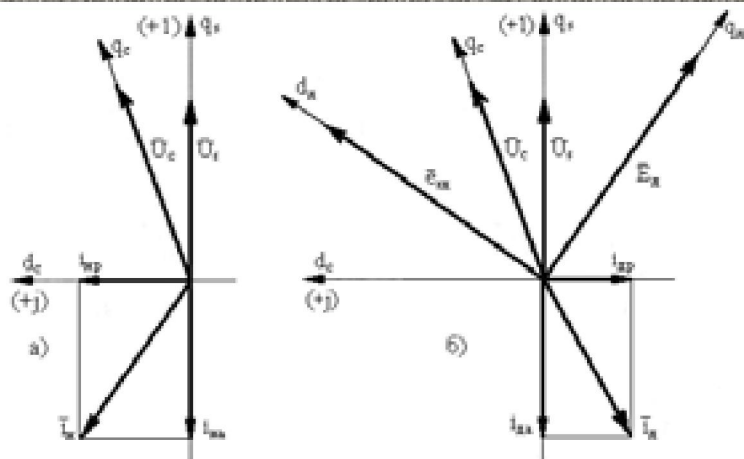


Рисунок 1 - Векторные диаграммы: статической нагрузки (а) и синхронного двигателя (б)

Для описания переходных процессов в электрических машинах комплексной модели нагрузки, можно применить общеизвестные уравнения Парка-Горева в общепринятой идеализации, т.е. рассматривается идеализированная машина, в которой отсутствуют механические потери, потери в стали статора и ротора, нелинейные магнитные явления, а также не учитываются гистерезис, высшие гармонические составляющие магнитного поля и др. [5].

Контурные уравнения статорных и роторных цепей электрической машины без демпферных контуров в системе относительных единиц, представим в простой и удобной для их анализа и решения форме записи:

$$-\bar{u}_s(t) = r_s \bar{i}_s(t) + (p + j)(x_s \bar{i}_s(t) + \bar{e}_r(t)); \quad (1)$$

$$\bar{u}_r(t) = \bar{e}_r(t) + (p + js_r)(\mu x_s \bar{i}_s(t) + \bar{e}_r(t))T_R; \quad (2)$$

где \bar{u}_s - вектор напряжения в узле электрической сети (статора машины);

- \bar{u}_r - вектор напряжения ротора электрической машины;

- \bar{i}_s - вектор тока статора машины;

- \bar{e}_r - вектор тока ротора, численно, равный ЭДС;

- r_s, x_s - активное и реактивное сопротивления статора машины;

- T_R - постоянная времени обмотки ротора машины;

- μ - коэффициент магнитной связи обмоток статора и ротора машины;

- s_r - скольжение ротора машины;

p - символ дифференцирования.

В данном случае уравнения Парка-Горева представлены как векторные уравнения для контуров статора и ротора симметричной обобщенной электрической машины, при отсутствии демпферных контуров, которые применимы для асинхронных и асинхронизированных синхронных машин.

Приведенные в [6] теоретические исследования и расчеты показывают неправомочность моделирования синхронных машин при отсутствии демпферных контуров одним электрическим контуром с продольной магнитной осью (обмотка возбуждения), так как это не соответствует физическим процессам, происходящим в реальных синхронных машинах. Чтобы устранить это несоответствие в исходную модель синхронной машины необходимо ввести короткозамкнутый контур, аналогичный по своим параметрам контуру обмотки возбуждения с поперечной магнитной осью, ортогональной продольной магнитной оси. Этот контур назван «фантомной обмоткой возбуждения», назначением которого является учет того обстоятельства, что магнитное поле в воздушном зазоре является круговым за счет магнитопроводов статора и ротора машины.

Таким образом, при моделировании синхронных и асинхронных машин уравнения обобщенной электрической машины можно представить как частный случай обобщенной электрической машины при $U_{Rd} = 0$ для синхронных машин и $U_{Rd} = 0$ $U_{Rq} = 0$ для асинхронных машин.

Уравнение движения ротора и электромагнитный момент электрической машины имеют следующий вид:

$$Jps_R = M_C(t) - M_{\vartheta}(t); \quad (3)$$

$$M_{\vartheta}(t) = \operatorname{Re} j(\bar{i}_R(t)\hat{e}_R(t)), \quad (4)$$

где M_C - момент сопротивления, приложенный к валу машины;

M_{ϑ} - электромагнитный момент машины;

J - момент инерции ротора машины;

Одним из источников периодических возмущений в энергосистемах являются мощные электродвигатели различных прокатных станов, графики изменения активной и реактивной мощностей которых приведены на рис. 2 [7]. Скорость изменения активной и реактивной мощности прокатных станов может достигать величин 200 - 400 МВА/с.

Для введения в расчет двигательной резкопеременной нагрузки момент сопротивления на валу электрической машины задается как функции времени, например, исходя из соответствия момента сопротивления изменению активной

мощности статора машины. Таким образом, при постоянном моменте инерции и малых изменениях угловой скорости ротора машины момент сопротивления можно определить как [1]:

$$M_C(t) = P(t)/(1-s) \approx P(t) \quad (5)$$

или

$$M_C(t) = P(t)/\omega_R \approx P(t) \quad (6)$$

где $M_C(t)$ – момент сопротивления на валу электрической машины;
 $P(t)$ – активная мощность статора машины, определяемая по графику;
 ω_R – угловая скорость ротора электрической машины.

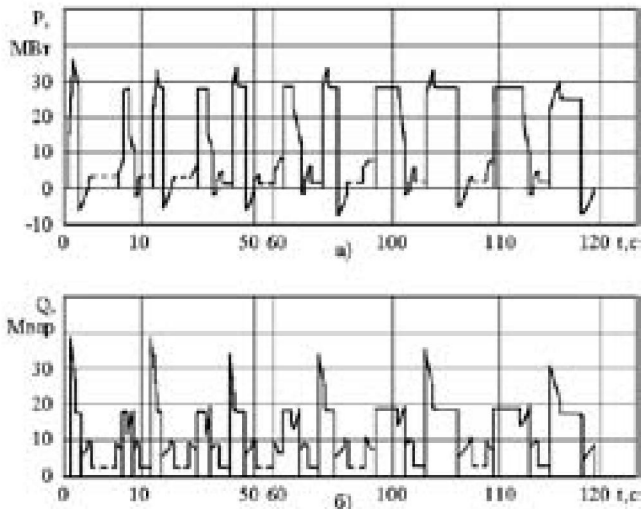


Рисунок 2 - Графики изменения активной (а) и реактивной (б) мощностей прокатного стана (слябинга 1250) за цикл прокатки

Результаты исследований, проведенные на действующих дуговых сталеплавильных печах [7] показали, что колебания активной и реактивной мощностей печи носят нерегулярный характер и зависят от ее технологического режима работы и мощности электропечной установки. Скорость изменения активной и реактивной мощности печи может достигать величины 500 МВА/с.

Уравнения статической нагрузки в системе координатных осей d_s , q_s можно представить в следующем виде:

$$\bar{u}_s(t) = r_H(t)\bar{i}_H(t) + (p + j)x_H(t)\bar{i}_H(t) \quad (7)$$

где \bar{i}_H - вектор тока нагрузки;

- r_H , x_H - активное и реактивное сопротивления нагрузки.

Статическую нагрузку можно представить сопротивлениями. Такой способ эквивалентен заданию статических характеристик активной и реактивной мощностей нагрузки в виде квадратичных зависимостей от напряжения [8]:

$$\dot{Z}_H(t) = r_H(t) + jx_H(t). \quad (8)$$

При моделировании статической резкопеременной нагрузки изменения ее активной и реактивной мощностей могут быть заданы как функции времени, например, в соответствии с графиком (рис. 3, [7]). Таким образом, при решении уравнения (7), для каждого момента времени можно определить активное и реактивное сопротивление нагрузки исходя из графиков изменения активной и реактивной мощностей нагрузки и напряжения в узле электрической сети:

$$\dot{Z}_H(t) = r_H(t) + jx_H(t) = \frac{\dot{S}_H(t)}{3\dot{I}_H^2(t)} = [P_H(t) + jQ_H(t)] \frac{U_S^2(t)}{P_H^2(t) + Q_H^2(t)}. \quad (9)$$

или

$$r_i(t) = \frac{U_S^2(t)P_i(t)}{P_i^2(t) + Q_i^2(t)}; \quad x_i(t) = \frac{U_S^2(t)Q_i(t)}{P_i^2(t) + Q_i^2(t)} \quad (10)$$

где $P_H(t)$ и $Q_H(t)$ – соответственно активная и реактивная мощности нагрузки, представленные в виде функций времени.

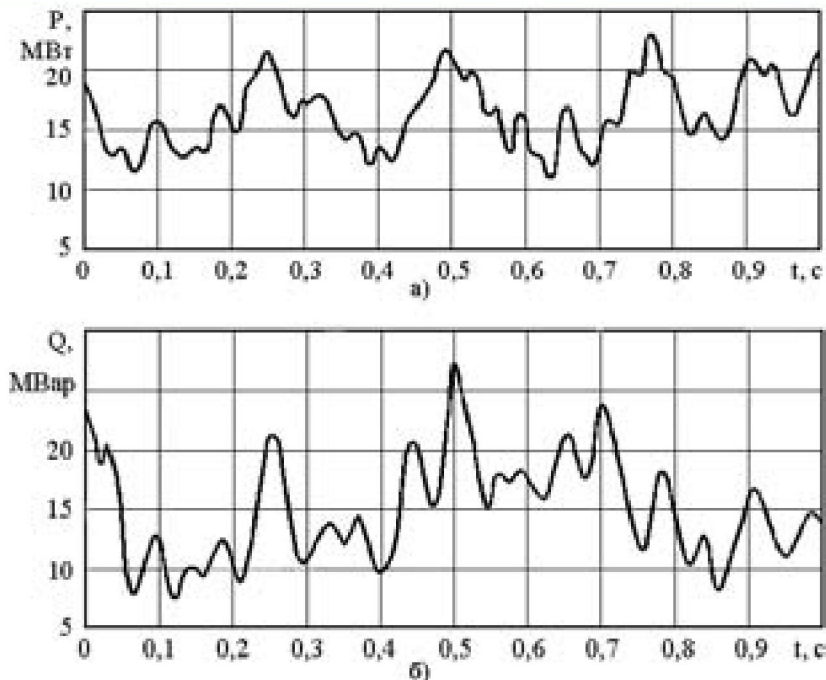


Рисунок 3 - Графики изменения активной (а) и реактивной (б) мощностей дуговой сталеплавильной печи ДСП-100 в период расплавления

Предложенная методика учета резкопеременных нагрузок при расчетах переходных режимов электрических систем на наш взгляд представляет интерес в связи с тем, что в настоящее время резкопеременные нагрузки оказывают значительное влияние на режимы работы различных энергетических установок: основного оборудования электрических станций, линий электропередачи и трансформаторных подстанций, а также показатели качества электроэнергии.

Кроме того предложенная методика может быть полезной как на стадии проектирования так и в процессе эксплуатации электрических систем при выборе мероприятий и (или) компенсирующих устройств, необходимых для снижения влияния резкопеременных нагрузок на электрическую сеть.

В связи со значительными различиями структуры нагрузок, а также различиями их статических и динамических характеристик, при детальном учете двигательной и статической нагрузок в многоэлементной комплексной модели необходимо выделение из комплексной нагрузки, резкопеременных нагрузок, к которым относят электроприводы различных прокатных станов, электродуговые сталеплавильные печи и др.

Представляет интерес на наш взгляд моделирование электрических машин переменного тока обобщенной электрической машиной без демпферных контуров, что приводит к значительному уменьшению количества дифференциальных уравнений для описания переходных процессов в электрических системах с комплексной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1985. - 536 с.
- 2 Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. - М.: Энергоиздат, 1981. - 208 с.
- 3 Зеккель А.С., Иванов В.Ф., Шлайфштейн В.А. Динамические свойства протяженных энергообъединений. // Электричество, 2001, №1. - с. 2-8.
- 4 Косоголов А.П., Шеломенцев А.С., Машевский С.А. Моделирование резкопеременных нагрузок систем электроснабжения. // Материалы международной научно-теоретической конференции «IV Торайгыровские чтения». 2 том. - Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2010. - с. 447-452.
- 5 Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 192 с.
- 6 Родюков Ф.Ф., Львович А.Ю. Уравнения электрических машин. - Спб.: Издательство СПбГУ, 1997, - 270 с.
- 7 Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 336 с.
- 8 Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.

Түйіндеме

Белсенеді және реактивті қуаты өзгерісі графиктерін негізге, электр торантарының ауыспалы режимді есептеу қасында, кенет ауыспалы электр жүктеме әдістемесі ұсынылды.

Resume

There a method of the account of sharply variable electric power loads, on the basis of diagram of change of their active and reactive powers is shown.