УДК 621.313.333

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Федоров М.М., Чорноус Е.В.
Донецкий национальный технический университет
pm@cld.dgtu.donetsk.ua

It modeling static and dynamic condition of three-phase circuit with inductive load by alternating states method. Received the dependences of circuit dinamyc behaviour from initial phase of voltage source and different range of asymmetric.

Одним из наиболее распространенных видов нагрузки в трехфазных сетях являются цепи с активно-индуктивным характером (трансформаторы, асинхронные двигатели и пр.). Подключение активно-индуктивных цепей к источникам синусоидального напряжения характеризуется определенными особенностями. Так, в однофазных цепях характер переходных процессов в значительной степени определяется начальной фазой напряжения ψ_u источника питания и углом ϕ нагрузки. При благоприятных условиях ($\psi_u - \phi = 0$) в цепи сразу после включения наступит установившийся (принужденный) режим [1]. При наиболее неблагоприятных условиях ($\psi_u - \phi = \pm\pi/2$) имеет место тяжелый переходный процесс, когда в цепи возникает ударный ток ($I_y = 2I_m$). Наличие ударного тока сопровождается различными явлениями, предъявляющими оборудованию повышенные требования надежности (увеличение механических усилий в обмотках и др.). В трехфазных цепях необходимо учитывать величину в трех фазах. Кроме того, при наличии различного рода неисправностей в отдельных фазах имеет место несимметричный режим, а величины ударных токов в фазах могут существенно возрасти. Этим вопросам, а также методам расчета и анализа переходных процессов посвящена данная статья.

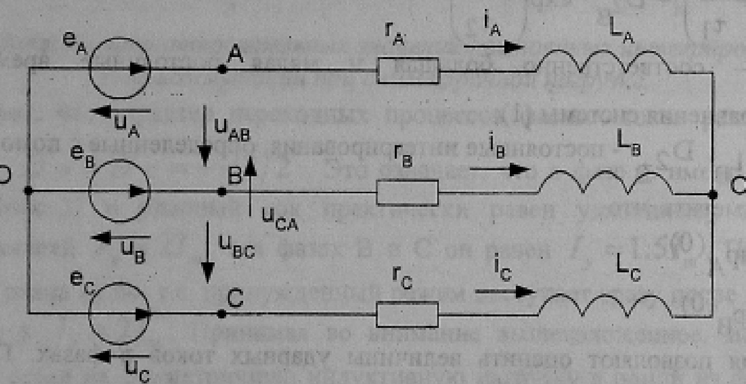

Рис. 1. – Трехфазная цепь с индуктивной нагрузкой

В общем случае трехфазная цепь с активно-индуктивным характером нагрузки изображена на рис. 1. Характерной особенностью данной цепи является индуктивное сечение. При расчете и анализе переходных процессов рационально использовать метод переменных состояния. В качестве переменных состояния выбирают токи двух фаз (например i_A и i_B). Система дифференциальных уравнений состояния, составленных по законам Кирхгофа, и записанная в форме Коши, имеет вид [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}i_A = a_{11}\cdot i_A + a_{12}\cdot i_B + b_{11}\cdot u_{AC} + b_{12}\cdot u_{BC} \\ \dfrac{d}{dt}i_B = a_{21}\cdot i_A + a_{22}\cdot i_B + b_{21}\cdot u_{AC} + b_{22}\cdot u_{BC} \\ i_C = -(i_A + i_B) \end{cases} \qquad (1)$$

где: $a_{11} = -\dfrac{r_A\cdot(L_B + L_C) + r_C\cdot L_B}{L^2}$; $\qquad a_{12} = \dfrac{r_B\cdot L_C - r_C\cdot L_C}{L^2}$;

$$a_{21} = \frac{r_A \cdot L_C - r_C \cdot L_A}{L^2}; \qquad a_{22} = -\frac{r_B \cdot (L_A + L_C) + r_C \cdot L_A}{L^2};$$

$$b_{11} = \frac{L_B + L_C}{L^2}; \qquad b_{12} = -\frac{L_C}{L^2}; \qquad b_{21} = -\frac{L_C}{L^2}; \qquad b_{22} = \frac{L_A + L_C}{L^2};$$

$$L^2 = L_A \cdot L_B + L_B \cdot L_C + L_C \cdot L_A.$$

Принимая во внимание то, что уравнения состояния записаны в форме Коши, при их решении удобно использовать численные методы. Однако для более глубокого и качественного анализа характера переходных процессов предпочтительно использовать расчеты с получением аналитического выражения переменных состояния. Подобный подход позволяет более точно и наглядно оценить влияние различных параметров трехфазной цепи на характер переходных процессов. В работе использован известный классический метод решения задач на переходные процессы, в результате которого решение представляется в виде суммы принужденной и свободной составляющих переменных состояния [1]. Выражения для принужденных составляющих можно получить из уравнений состояния, записанных в комплексной форме, и, решив их символическим методом [1]. Как функции времени принужденные составляющие записываются в виде:

$$i_{пр_A} = I_{m_A} \cdot \sin(\omega t + \psi_{i_A});$$

$$i_{пр_B} = I_{m_B} \cdot \sin(\omega t + \psi_{i_B}).$$

Выражения свободных составляющих:

$$i_{св_A} = D_{1_A} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + D_{2_A} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

$$i_{св_B} = D_{1_B} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + D_{2_B} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

где: τ_1, τ_2 – соответственно большая и малая постоянные времени, определяемые из характеристического уравнения системы (1);

$D_{1_A}, D_{2_A}, D_{1_B}, D_{2_B}$ - постоянные интегрирования, определенные с помощью начальных условий.

Необходимо отметить, что

$$D_{1_A} + D_{2_A} = i_{пр_A}(0);$$

$$D_{1_B} + D_{2_B} = i_{пр_B}(0).$$

Эти выражения позволяют оценить величины ударных токов в фазах. При тяжелых переходных процессах, когда $|\psi_{i_A}| = |\psi_{i_B}| = \frac{\pi}{2}$, величины ударных токов будут соответственно равны $I_{y_A} = 2I_{m_A}$ и $I_{y_B} = 2I_{m_B}$. Длительность воздействия ударных токов определяется величинами постоянных времени τ_1 и τ_2, а так же их отношением. Длительность переходных процессов $t_{пп}$ можно принять равной $t_{пп} = 4\tau$. Обычно для силовых катушек это означает (30 .. 100) периодов колебаний напряжения промышленной частоты. Если

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} < (2 .. 4),$$

то длительность воздействия ударных токов можно считать равной τ_1 . При больших соотношениях постоянных времени для оценки величины и длительности воздействия ударных токов необходимо учитывать значения постоянных интегрирования.

Особенности переходных процессов при включении трехфазных цепей с различными симметричной и несимметричными нагрузками рассмотрим на конкретных примерах. В основе используем силовую трехфазную катушку с параметрами (рис. 1) $r_A = r_B = r_C = 6\,Ом$ и $L_A = L_B = L_C = 1\,Гн$. Катушка подключается к симметричному источнику трехфазного напряжения $u_A = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$. Начальная фаза ψ_u напряжения u_A может изменяться в пределах $0 .. 2\pi$ и соответственно изменяются напряжения u_B, u_C.

В симметричном режиме значения принужденных составляющих фазных токов равны

$I_{пр} = I_{пр_A} = I_{пр_B} = I_{пр_C} = 0.7A$. Порядок системы уравнений состояния (1) понижается до первого, поэтому выражения свободных составляющих имеют вид:

$$i_{св_A} = D_A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right); \quad i_{св_B} = D_B \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right); \quad i_{св_C} = D_C \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Здесь постоянная времени $\tau = \frac{L}{r} = 0.167$ с. Постоянные интегрирования при нулевых начальных условиях соответственно равны:

$$D_A = -i_{пр_A}(0); \quad D_B = -i_{пр_B}(0); \quad D_C = -i_{пр_C}(0).$$

Их величины определяются $I_{пр}$ и ψ_u. На рис. 2 приведены относительные значения постоянных интегрирования

$$D^*_A = \frac{D_A}{I_{пр}} \qquad D^*_B = \frac{D_B}{I_{пр}} \qquad D^*_C = \frac{D_C}{I_{пр}}$$

как функции угла коммутации ψ_u.

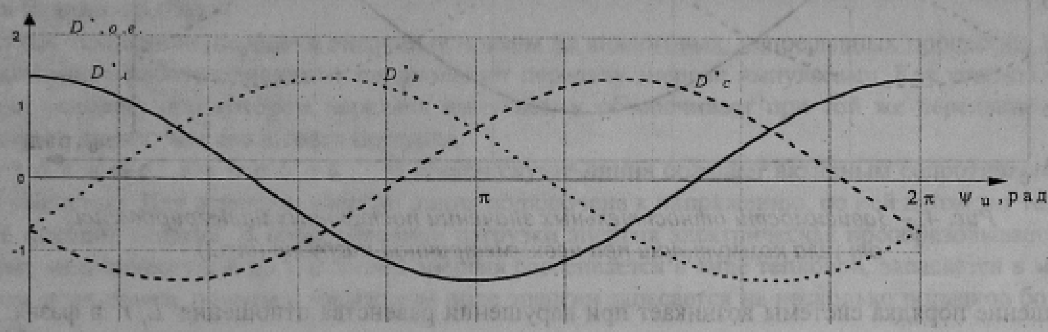

Рис 2. – Зависимости относительных значений постоянных интегрирования от угла коммутации при симметричной нагрузке.

Из рис. 2 следует, что характер переходных процессов фазных токов различен. Так, при $\psi_u = 0$ величина $D^*_A = \sqrt{2}$, а $D^*_B = D^*_C = -\sqrt{2}/2$. Это означает, что в фазе А имеет место наиболее тяжелый переходный процесс (рис. 3) и ударный ток практически равен удвоенному амплитудному значению принужденной составляющей $I_y = 2I_m$, а в фазах В и С он равен $I_y = 1.5I_m$. При $\psi_u = \pi/2$ свободная составляющая в фазе А равна нулю, т.е. принужденный режим наступает сразу после коммутации. В фазах В и С ударный ток близок к $I_y = 2I_m$. Принимая во внимание вышеизложенное, можно отметить, что при включении трехфазных сетей на симметричную индуктивную нагрузку в одной из фаз ударный ток близок к $I_y = 2I_m$ при любом значении ψ_u.

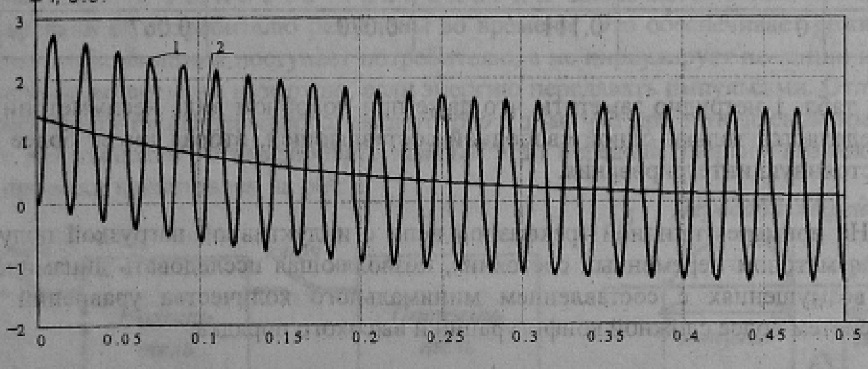

Рис. 3. – Переходный процесс тока фазы А при включении трехфазной цепи на симметричную индуктивную нагрузку при $\psi_u = 0$.

Несимметричные режимы рассмотрим на примере включения трехфазных катушек с различного рода неисправностями. Так при витковых замыканиях сопротивления поврежденных фаз уменьшаются, а при обрыве параллельных ветвей соответственно возрастает.

Из расчетов следует, что при пропорциональном изменении активного сопротивления и индуктивности в фазах катушки порядок системы остается равным единице, так же как и в симметричном режиме. Более того, значение корня характеристического уравнения не изменяется, что говорит о неизменности характера переходного процесса. Такие неисправности влияют лишь на установившийся режим – при межвитковых замыканиях фазные токи увеличиваются и соответственно уменьшаются при обрыве параллельных ветвей. Об ударных значениях тока можно судить по величине постоянных интегрирования. На рис. 4 приведены зависимости постоянных интегрирования от угла коммутации для случая, когда сопротивление одной из фаз (в данном случае фазы А) уменьшено в 2 раза. При подобных повреждениях наибольшую токовую нагрузку, в динамике превышающую четырехкратное значение принужденной составляющей, испытывает поврежденная фаза при выполнении условия $\psi_u = 0 \pm n\pi$ (самый неблагоприятный угол коммутации, соответствующий наибольшим значениям постоянной интегрирования тока поврежденной фазы).

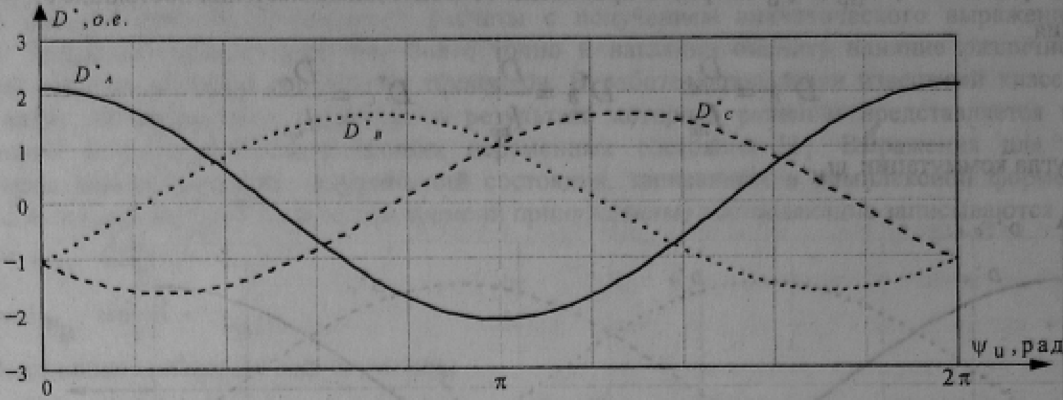

Рис. 4. – Зависимости относительных значений постоянных интегрирования от угла коммутации при несимметричной нагрузке (m=2).

Повышение порядка системы возникает при нарушении равенства отношения L/r в фазах. К примеру, авторами смоделирован режим понижения только лишь индуктивности в одной из фаз для угла коммутации $\psi_u = 0$. Данные этого исследования сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики переходных процессов несимметричной трехфазной цепи при включении.

m	1	2	5	10	режим КЗ
I^*_A	1	1.50	2.14	2.50	3.00
I^*_B	1	1.15	1.40	1.54	1.73
I^*_C	1	1.14	1.36	1.50	1.73
$I^*_{A\,уд}$	2.89	4.24	6.06	7.07	8.49
$I^*_{B\,уд}$	2.89	3.26	3.94	4.36	4.90
$I^*_{C\,уд}$	2.89	3.23	3.86	4.24	4.90
τ_1	0.167	0.167	0.167	0.166	0.167
τ_2	0	0.111	0.070	0.067	0

Из данных табл. 1 нетрудно заметить, что даже при подобном виде несимметрии переходный процесс практически определяется только одной свободной составляющей, вторая имеет более быстрое затухание и весьма малую постоянную интегрирования.

Выводы: На примере типичной трехфазной цепи с индуктивной нагрузкой получена математическая модель, описанная методом переменных состояния, позволяющая исследовать динамические свойства цепей при различных возмущениях с составлением минимального количества уравнений. Метод может быть использован для систем более сложной конфигурации и высокого порядка.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Основы теории цепей / Атабеков Г.И. / – М.: Энергия, 1989. – 424 с.
2. Федоров М.М. Особенности формирования уравнений состояния в различных электрических сетях / Взрывозащищенное электроборудование: сб. научн. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд.» 2004. – с. 33-37.