УДК 621.313

СМЯГЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К СЕТИ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ

Дорохов А.В., инж., Финкельштейн В.Б., д.т.н., проф.,
Харьковская государственная академия городского хозяйства
Украина, 61002, Харьков, ул, Революции, 12, кафедра электротехники
Тел. (0572) 21-93-69, E-mail: final@kharkov.ukrpack.net

Разработана методика расчета переходных токов и моментов при подключении асинхронных генераторов к сети. Исследована и освещена возможность их снижения за счет неодновременного подключения фаз обмотки генератора на параллельную работу с сетью. Даны рекомендации по формированию оптимального алгоритма включения. Описаны явления сопутствующие переходному процессу.

Розроблена методика розрахунку перехідних струмів та моментів при підключенні асинхронних генераторів до мережі. Досліджена та освітлена можливість їх зниження за рахунок неодночасного підключення фаз обмотки генератора на паралельну роботу з мережею. Запропоновані рекомендації з формування оптимального алгоритму включення. Описані явища супроводжуючі перехідний процес.

Асинхронные генераторы ветроэлектроагрегатов подключаются к сети, когда ротор вращается с синхронной скоростью. После подключения возникают ударные переходные токи и моменты в несколько раз превышающие номинальные. Это обусловливает необходимость выполнения механической части ветроэлектроагрегата с большим запасом прочности, а в электрической части – приходиться завышать типоразмеры пускозащитной аппаратуры. При неодновременном подключении фаз обмотки генератора к сети указанные перегрузки существенно снижаются [3]. Целью настоящей статьи является определение оптимальных начальных фаз напряжения, при которых следует подключать фазы обмотки генератора и исследование переходных ударных моментов и токов.

При двухфазном подключении, в неподвижной системе координат, в осях α, β процессы в асинхронной машине описываются следующей системой дифференциальных уравнений [5]:

$$i_{s\beta}R_s + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha_u) \qquad (1)$$

$$i_{r\alpha}R_r + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \psi_{r\beta} = 0 \qquad (2)$$

$$i_{r\beta}R_r + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \psi_{r\alpha} = 0 \qquad (3)$$

где $\psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ - потокосцепления статора по оси β и ротора по осям α и β соответственно, Вб; $i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ - токи статора по оси β и ротора по осям α и β соответственно, А; R_s, R_r – сопротивления обмоток статора и ротора соответственно, Ом; U_m – максимальное значение линейного напряжения; α_u – начальная фаза линейного напряжения; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сети; ω_r – скорость вращения ротора в электрических радианах, так как рассматривается подключение при синхронной скорости вращения ротора, то $\omega_r = \omega$; t – время, сек.

Так как рассматривается двухфазное включение, то все сопротивления и индуктивности должны быть удвоенны, относительно соответствующих фазных величин.

Потокосцепления могут быть выражены через токи:

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_\mu i_{r\beta} \qquad (4)$$

$$\psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} \qquad (5)$$

$$\psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_\mu i_{s\beta} \qquad (6)$$

откуда

$$i_{s\beta} = \frac{\psi_{s\beta} - k_r \psi_{r\beta}}{L_s'} \qquad (7)$$

$$i_{r\beta} = \frac{\psi_{r\beta} - k_s \psi_{s\beta}}{L_r'} \qquad (8)$$

$$i_{r\alpha} = \frac{\psi_{r\alpha}}{L_r} \qquad (9)$$

где L_s – полная индуктивность статора; L_r – полная индуктивность ротора; L_μ - взаимоиндуктивность; $L_s' = L_s - \frac{L_\mu^2}{L_r}$ - приведенная к статору результирующая индуктивность неподвижной асинхронной машины без активных сопротивлений; $L_r' = L_r - \frac{L_\mu^2}{L_s}$ - приведенная к ротору результирующая индуктивность неподвижной асинхронной машины без активных сопротивлений, при закороченной обмотке статора и разомкнутой обмотке ротора; $k_s = \frac{L_\mu}{L_s}$ - коэффициент связи статора; $k_r = \frac{L_\mu}{L_r}$ - коэффициент связи ротора.

Подставив (7) – (9) в (1) - (3) получим:

$$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + \frac{R_s}{L_s'}\psi_{s\beta} - k_r \frac{R_s}{L_s'}\psi_{r\beta} = U_m \sin(\omega t + \alpha_u) \qquad (10)$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \frac{R_r}{L_r}\psi_{r\alpha} + \omega_r \psi_{r\beta} = 0 \qquad (11)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - k_s \frac{R_r}{L_r'}\psi_{s\beta} + \frac{R_r}{L_r'}\psi_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha} = 0 \qquad (12)$$

Система (10) - (12) имеет нулевые начальные условия, так как до подключения к сети генератор не работает, а величина остаточного магнитного потока не превышает 0,25% и ею можно пренебречь.

Применяя операторный метод решения системы дифференциальных уравнений (10) – (12), с учетом нулевых начальных условий, для ее изображения по Лапласу получим:

$$\left(p+\frac{R_s}{L_s'}\right)\Psi_{s\beta}-k_r\frac{R_s}{L_s'}\Psi_{r\beta}=U_m\frac{\omega\cos(\alpha_u)+p\sin(\alpha_u)}{p^2+\omega^2} \quad (13)$$

$$\left(p+\frac{R_r}{L_r}\right)\Psi_{r\alpha}+\omega_r\Psi_{r\beta}=0 \quad (14)$$

$$\left(p+\frac{R_r}{L_r'}\right)\Psi_{r\beta}-k_s\frac{R_r}{L_r'}\Psi_{s\beta}-\omega_r\Psi_{r\alpha}=0 \quad (15)$$

где $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$ и $\Psi_{r\beta}$ - изображения соответствующих потокосцеплений.

Главный определитель системы (13) - (14)

$$\Delta=\begin{vmatrix} p+\frac{R_s}{L_s'} & 0 & -k_r\frac{R_s}{L_s'} \\ 0 & p+\frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ -k_s\frac{R_r}{L_r'} & -\omega_r & p+\frac{R_r}{L_r'} \end{vmatrix}=p^3+a_1p^2+a_2p+a_3 \quad (16)$$

где $$a_1=\frac{R_s}{L_s'}+\frac{R_r}{L_r'}+\frac{R_r}{L_r};$$

$$a_2=\frac{R_sR_r}{L_s'L_r'}(1-k_sk_r)+\frac{R_r}{L_r'}\left(\frac{R_r}{L_r}+\frac{R_s}{L_s'}\right)+\omega_r^2;$$

$$a_3=\frac{R_sR_r^2}{L_s'L_r'L_r}(1-k_sk_r)+\omega_r^2\frac{R_s}{L_s'}.$$

Алгебраическое дополнение:

$$\Delta_{s\beta}=\begin{vmatrix} U_m\frac{\omega\cos(\alpha_u)+p\sin(\alpha_u)}{p^2+\omega^2} & 0 & -k_r\frac{R_s}{L_s'} \\ 0 & p+\frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ 0 & -\omega_r & p+\frac{R_r}{L_r'} \end{vmatrix}=$$

$$=U_m\frac{p^3b_1+p^2b_2+pb_3+b_4}{p^2+\omega^2} \quad (17)$$

где $$b_1=\sin(\alpha_u);$$

$$b_2=\left(\frac{R_r}{L_r}+\frac{R_r}{L_r'}\right)\sin(\alpha_u)+\omega\cos(\alpha_u);$$

$$b_3=\left(\frac{R_r}{L_r}+\frac{R_r}{L_r'}\right)\omega\cos(\alpha_u)+\left(\frac{R_r^2}{L_rL_r'}+\omega_r^2\right)\sin(\alpha_u);$$

$$b_4=\left(\frac{R_r^2}{L_rL_r'}+\omega_r^2\right)\omega\cos(\alpha_u)$$

Изображение потокосцепления статора по оси β

$$\Psi_{s\beta}=\frac{\Delta_{s\beta}}{\Delta}$$

$$\Psi_{s\beta}=U_m\frac{p^3b_1+p^2b_2+pb_3+b_4}{\left(p^3+p^2a_1+pa_2+a_3\right)\cdot\left(p^2+\omega^2\right)} \quad (18)$$

Для перехода от изображения к оригиналу потокосцепления необходимо дробно-рациональную часть (18) разложить на слагаемые. Предварительно следует, приравняв знаменатель нулю, найти корни полученного уравнения. Первый сомножитель представляет собой кубическое уравнение, его корни при *v> 0* можно определить по формулам [1]:

$$q=\frac{a_1^3}{27}-\frac{a_1}{6}+\frac{a_3}{2};\qquad v=\frac{3a_2-a_1^2}{9};$$

$$o=\mathrm{sgn}(q)\sqrt{|v|};\quad \gamma=\frac{1}{3}Arsh\frac{q}{o^3}$$

$$\lambda_1=-2osh(\gamma)-\frac{a_1}{3} \quad (19)$$

$$\lambda_2=2o(sh(\gamma)+j\sqrt{3}ch(\gamma))-\frac{a_1}{3} \quad (20)$$

$$\lambda_3=2o(sh(\gamma)-j\sqrt{3}ch(\gamma))-\frac{a_1}{3} \quad (21)$$

Корни второго сомножителя:

$$\lambda_{4,5}=\pm j\omega \quad (22)$$

Зная $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4$ и λ_5 (18) можно представить в виде

$$\Psi_{s\beta}=U_m\left(\frac{A_1}{p-\lambda_1}+\frac{A_2}{p-\lambda_2}+\frac{A_3}{p-\lambda_3}+\frac{A_4}{p-\lambda_4}+\frac{A_5}{p-\lambda_5}\right) \quad (23)$$

где

$$A_k=\frac{\lambda_k^3b_1+\lambda_k^2b_2+\lambda_kb_3+b_4}{5\lambda_k^4+4a_1\lambda_k^3+3(a_2+\omega^2)\lambda_k^2+2\lambda_k(a_3+a_1\omega^2)+a_2\omega^2} \quad (24)$$

(24) - представляет собой отношение числителя дроби (18) к производной от знаменателя по p при $p=\lambda_k$;

Переход от изображения к оригиналу может быть осуществлен с помощью теоремы разложения:

$$\psi_{sb}=U_m\sum_{k=1}^{5}A_k\exp(\lambda_kt) \quad (25)$$

Функция потокосцепления статора (25) будет действительной при наличии комплексных корней и коэффициентов А. Четыре корня знаменателя (18) представляют собой две пары комплексных взаимно сопряженных чисел: $\lambda_{2,3}$ и $\lambda_{4,5}$. Представим эти числа в тригонометрической форме.

$$\lambda_2=M(\cos(\beta)+j\sin(\beta)) \quad (26)$$

$$\lambda_3=M(\cos(\beta)-j\sin(\beta)) \quad (27)$$

где $$M=\sqrt{\left(2osh(\gamma)-\frac{a_1}{3}\right)^2+3ch^2(\gamma)};$$

$$\beta=arctg\frac{\sqrt{3}ñh(\gamma)}{2osh(\gamma)-\frac{a_1}{3}}.$$

Учитывая (24), (26) и (27) для суммы второго и третьего слагаемых (25) можно записать:

$$A_2 e^{\lambda_2 t} + A_3 e^{\lambda_3 t} =$$

$$= \frac{\exp(tM\cos(\beta))\sum_{k=1}^{4} b_k M^{4-k} B}{\sum_{k=1}^{5} c_k M^{5-k}\{\cos[(5-k)\beta] + j\sin[(5-k)\beta]\}} +$$

$$+ \frac{\exp(tM\cos(\beta))\sum_{k=1}^{4} b_k M^{5-k} \tilde{N}}{\sum_{k=1}^{5} c_k M^{5-k}\{\cos[(5-k)\beta] - j\sin[(5-k)\beta]\}}$$

где:

$$B = \{\cos[(4-k)\beta + tM\sin(\beta)] + j\sin[(4-k)\beta + tM\sin(\beta)]\}$$

$$C = \{\cos[(4-k)\beta + tM\sin(\beta)] - j\sin[(4-k)\beta + tM\sin(\beta)]\}$$

$$\tilde{n}_1 = 5\ ;\ \ c_2 = 4a_1\ ;\ \ \tilde{n}_3 = 3(a_2 + \omega^2)\ ;$$

$$c_4 = 2(a_3 + a_1\omega^2)\ ;\ \ c_5 = a_2\omega^2\ .$$

Числитель и знаменатель второго слагаемого представленной суммы являются соответственно комплексно сопряженными числителю и знаменателю первого слагаемого, следовательно комплексно сопряженными являются и сами отношения. А сумма двух комплексно сопряженных чисел равна удвоенной действительной части любого из них. Ситуация с четвертым и пятым слагаемыми (25) будет аналогичной.

Из (10)

$$\psi_{r\beta} = \frac{\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + \frac{R_s}{L_s'}\psi_{s\beta} - U_m\sin(\omega t + \alpha_u)}{k_r\frac{R_s}{L_s'}} \qquad (28)$$

Подставив (25) в (28) получим:

$$\psi_{r\beta} = \frac{U_m}{k_r\frac{R_s}{L_s'}}\left[\left(\sum_{k=1}^{5} A_k\left(\lambda_k + \frac{R_s}{L_s'}\right)\exp(\lambda_k t)\right) - \sin(\omega t + \alpha_u)\right] \qquad (29)$$

Уравнение (11) является линейным дифференциальным уравнением первого порядка относительно $\psi_{r\alpha}$, его интеграл имеет вид:

$$\psi_{r\alpha} = -\omega_r\exp\left(-\frac{R_r}{L_r}t\right)\int\psi_{r\beta}\exp\left(\frac{R_r}{L_r}t\right)dt \qquad (30)$$

Подставив потокосцепление $\psi_{r\beta}$ (29) в выражение для потокосцепления $\psi_{r\alpha}$ (30) и произведя интегрирование получим:

$$\psi_{r\alpha} = -\frac{\omega_r U_m}{k_r\frac{R_s}{L_s'}}[E + D] \qquad (31)$$

где:

$$E = \sum_{k=1}^{5} A_k\left(\frac{\lambda_k + \frac{R_s}{L_s'}}{\lambda_k + \frac{R_r}{L_r}}\right)\exp(\lambda_k t)$$

$$D = \frac{1}{\left(\frac{R_r}{L_r}\right)^2 + \omega^2}F$$

$$F = \omega\cos(\omega t + \alpha_u) - \frac{R_r}{L_r}\sin(\omega t + \alpha_u)$$

После вычисления потокосцеплений ψ_{sb}, ψ_{rb} и $\psi_{r\alpha}$ (25, 29,31) представляется возможным определение токов $i_{s\beta}$, $i_{r\beta}$ и $i_{r\alpha}$ (7- 9). По известным токам и потокосцеплениям момент генератора может быть представлен в виде:

$$M_\Gamma = p(\psi_{r\beta} i_{r\alpha} - \psi_{r\alpha} i_{r\beta}) \qquad (32)$$

На базе изложенной методики для двухфазного включения и известной [4] – для трехфазного была составлена программа и расчитаны токи и моменты при подключении двух фаз генератора к сети с последующим, с некоторым запаздыванием, подключением третей фазы. Начальными условиями для трехфазного включения являлись значения потокосцеплений двухфазного включения в момент подключения третей фазы генератора к сети.

При оптимальном включении, двух фаз в момент, когда линейное напряжение сети максимально с подключением третей фазы, когда максимально ее фазное напряжение, наибольшее при переходном процессе значение тока (рис.1) примерно в два раза меньше чем при одновременном включении трех фаз. Наибольшая кратность момента (рис.2) – меньше в 1,5 раза.

При наиболее неблагоприятном подключении, при нулевых значениях линейного и фазного напряжений наибольшее значение тока равно току при одновременном включении трех фаз (рис. 3), а величина момента в 2,3 раза (рис.4) превышает момент при одновременном трехфазном включении.

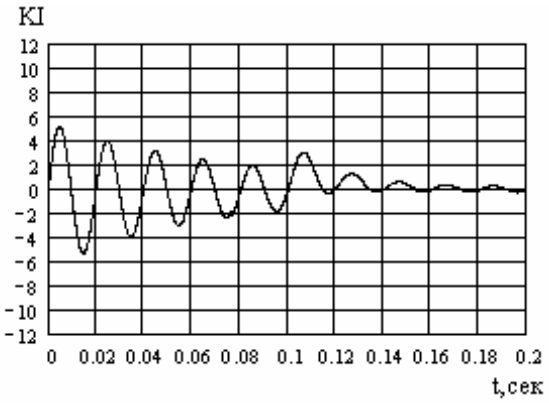

Рис.1 Изменение во времени кратности тока при оптимальном включении.

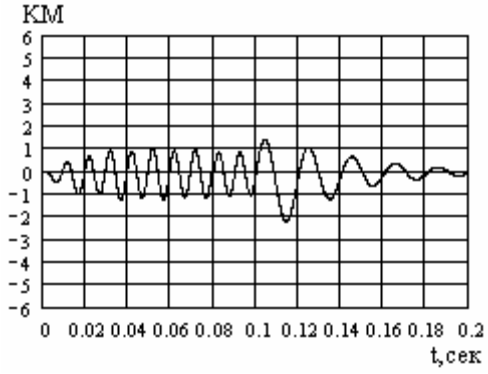

Рис.2 Изменение во времени кратности момента при оптимальном включении.

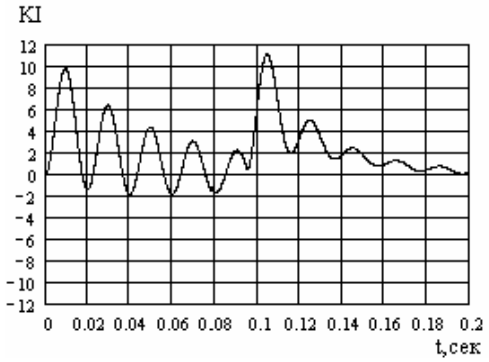

Рис.3 Изменение во времени кратности тока при неоптимальном включении

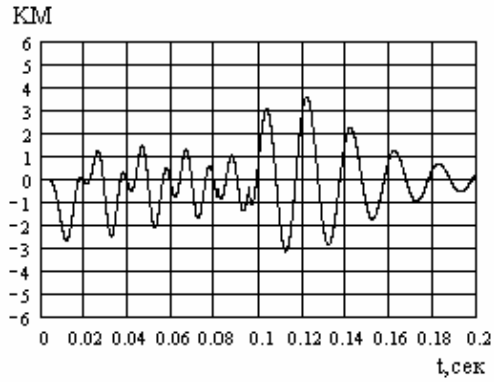

Рис.4 Изменение во времени кратности момента при неоптимальном включении

В значительной степени максимальные в переходном процессе токи и моменты, как при оптимальном включении (рис.5) так и при наиболее неблагоприятном (рис.6) зависят от интервала времени между подключением двух фаз и включением третей фазы. Чем больше периодов укладывается в указанном интервале времени, тем меньше величина момента. Кратность тока при интервале времени, превышающем три периода, остается, практически, неизменной. Так, при оптимальном подключении, при интервале времени между включением двух фаз и подключением третей фазы равном девяти периодам наибольшая кратность момента составила 1,5, а кратность тока – 5,3.

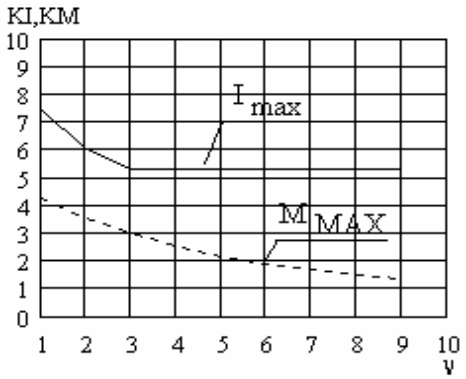

Рис.5 Зависимость наибольшего значения кратности момента при переходном процессе от числа периодов прошедших между включением двух фаз и подключением третьей фазы при оптимальных моментах включения.

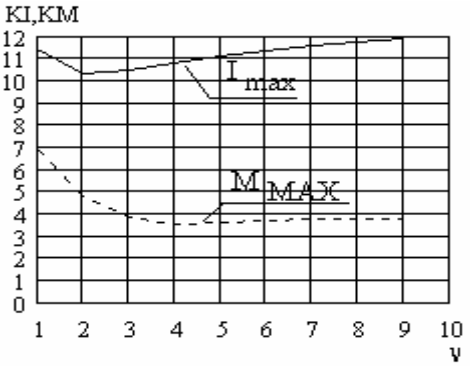

Рис. 6 Зависимость наибольшего значения кратности момента при переходном процессе от числа периодов прошедших между включением двух фаз и подключением третьей фазы при неблагоприятных моментах включения

Следует отметить, что при оптимальном двухфазном включении возникает пульсирующий с удвоенной частотой сети момент, кратность амплитуды которого доходит до 1,3. Это обусловливает вибрацию с удвоенной частотой сети ветроэлектроагрегата, что необходимо учитывать при расчете его механической части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для снижения ударных токов и моментов при запуске ветроэлектроагрегатов необходимо производить неодновременное подключение фаз генератора к сети, что позволяет, примерно в два раза снизить их кратности.

Подключение третей фазы при неодновременном включении следует производить по прошествии 9-10 периодов, что при частоте сети 50 Гц составляет 0,2 сек.

При проектировании ветроэлектроагрегатов следует учитывать пульсирующий с удвоенной частотой сети момент, возникающий при двухфазном включении, вызывающий вибрацию ветроэлектроагрегата.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике.- М.: Физматгиз. 1959. – 608 с.

[2] *Деч Г.* Руководство к практическому применению преобразования Лапласа.- М.: Наука. 1965. – 288 с.

[3] *Петров Л.П., Ладензон В.А., Обуховский М.П., Подзолов Р.Г.* Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами.- М.: Энергия. 1970. – 127 с.

[4] *Ковач К.П., Рац И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963. –744

[5] *Трещев И.И.* Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия. 1980. – 344 с.

Поступила 20.02.03