



**ВЕТРОГЕНЕРАТОР НА БАЗАТА НА КАСКАДНО СЪЕДИНЕНИЕ НА ДВЕ
АСИНХРОНИЗИРАНИ СИНХРОННИ МАШИНИ**
Н.Ф.Джагаров, Ю.В.Джагарова

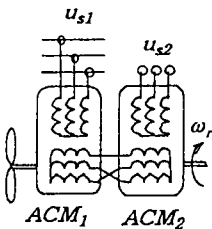
Въведение

Един от основните проблеми на ветрогенераторите е генерирането на електроенергия с постоянни параметри при променлива скорост на въртене на въздушната турбина. Използваните за това методи страдат от съществени недостатъци, както при автономна, така и при паралелна работа [1].

Един от методите за стабилизация на параметрите на генерираната от ветрогенератора електроенергия е използването на асинхронизирана синхронна машина (АСМ), възбудена от трифазен източник с честота на хлъзгането. По този начин във въздушната междина на машината се създава поле с постоянна честота, при което регулирайки амплитудата и фазата на възбудянето се регулират режимите на работа и товарът на ветрогенератора [2].

Схема на ветрогенератора

Изискванията за надеждност довеждат до използването на безконтактни АСМ, представляващи каскадно съединение на две АСМ на един вал - фиг.1. Подавайки постоянна честота на захранване на статора на възбудителната машина АСМ₂, в ротора ѝ автоматично се индуцира напрежение с честотата на хлъзгане, при това за облекчаване на възбудянето се кръстосват фазите на роторите. По този начин магнитните полета на роторите се въртят в



Фиг.1.

различни посоки, като в общия случай основната АСМ₁ и възбудителната машина АСМ₂ могат да имат различен брой полюси $p_1 \neq p_2$. Управлявайки възбудянето на АСМ₂ u_{s2} във функция на скоростта на въртене на ротора $\omega_r = v/\omega_g$, параметрите на генерираното напрежение u_{s1} ще бъдат постоянни. Използването на каскадно съединение на две АСМ освен че повишава надеждността на ветрогенератора, има и други положителни качества, котвената намотка на възбудителя може да бъде с по-високо напрежение, облекчава се и управлението му, т.к. възбудителят АСМ₂ се явява и усилвател на мощност.

Математически модел на ветрогенератора

За изследването на такова каскадно съединение на две АСМ, за избора на оптимални режими на работа и законите за регулиране е необходимо да се извърши моделиране. Очевидна е трудността при съставянето на математическия модел, обусловена от свързването на две електрически машини с кръстосани фази и различни параметри. В [3] е предложен модел на безконтактна АСМ, на базата на еквивалентна заместваща схема, съдържаща взаимни индуктивности, получаващи се чрез роторите. В [4] е предложен метод за съставяне на модели на произволни каскадни съединения на произволни електрически машини.

Използвайки този метод [4], разглеждащ двете машини отделно и обединяващ моделите им в общ модел чрез уравнения на връзките, ще можем да запишем уравненията на безконтактния ветрогенератор в следния вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{r1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{s1s1} & A_{s1r1} & 0 \\ A_{r1s1} & A_{r1r1} & 0 \\ 0 & A_{s2r1} & A_{s2s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{r1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{s1s1} & B_{s1r1} & 0 \\ B_{r1s1} & B_{r1r1} & 0 \\ 0 & B_{s2r1} & B_{s2s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{s1} \\ U_{r1} \\ U_{s2} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

където: $I_{s1} = \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix}$; $I_{s2} = \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix}$; $I_{r1} = \begin{bmatrix} i_{rd1} \\ i_{rq1} \end{bmatrix}$; $U_{s1} = \begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \end{bmatrix}$; $U_{s2} = \begin{bmatrix} u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix}$;

$U_{r1} = \begin{bmatrix} u_{rd1} \\ u_{rq1} \end{bmatrix}$; индексите 1 и 2 се отнасят съответно за АСМ1 и АСМ2;

индексът s - за статорните променливи и параметри, а r - за роторните; елементите на матриците B_{ij} са функции на параметрите на машините, а на A_{ij} - на ъгловите скорости ω_{k1} , ω_{k2} на координатните оси $dq0_1$ и $dq0_2$, в които са записани уравненията на отделните машини, и на ъгловата скорост на въртене на ветрогенератора ω_r .

Неизвестните вектори на статорните напрежения на АСМ1 и АСМ2, съответно U_{s1} и U_{s2} се намират от уравненията на мрежите, към които са съединени. Неизвестният вектор на роторните напрежения U_{r1} се намира от уравненията на връзките за роторните намотки, получавани чрез първия закон на Кирхоф в диференциална форма:

$$m_1 \frac{d}{dt} I_{r1} + m_2 \cdot T_{r12} \frac{d}{dt} I_{r2} + m_2 \cdot T_{r12}' I_{r2} = 0; \quad (2)$$

където: мащабните коефициенти се изчисляват чрез съотношенията - $m_1 = S_1 / S_I$, $m_2 = S_2 / S_I$; матрицата за преобразуване от оси $dq0_2$ в $dq0_1$ на роторните променливи:

$$T_{r12} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} \\ \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} \end{bmatrix}; \text{ където } \theta_{12} = \int_0^t [(\omega_{k1} + \omega_{k2}) - (p_1 + p_2)\omega_r] dt;$$

$$T_{r12}' = \frac{d}{dt} T_{r12} = \begin{bmatrix} \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} \\ \cos\theta_{12} & -\sin\theta_{12} \end{bmatrix} [(\omega_{k1} + \omega_{k2}) - (p_1 + p_2)\omega_r].$$

При избор на скоростта на въртене на втората координатна система $dq0_2$, $\omega_{k2} = -\omega_{k1} + (p_1 + p_2)\omega_r$: $T_{r12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ и $T_{r12}' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ (3)

Замествайки в (2) производните на роторните токове чрез десните части от (1), и отчитайки (3), тогава (2) ще придобие следния вид:

$$m_1 (H_{r1} + B_{r1r1} \cdot U_{r1}) + m_2 \cdot T_{r12} (H_{r2} + B_{r2r2} \cdot U_{r2}) = 0; \quad (4)$$

където: $H_{r1} = A_{r1s1} \cdot I_{s1} + A_{r1r1} \cdot I_{r1} + B_{r1s1} \cdot U_{s1}$;

$$H_{r2} = A_{r2s2} \cdot I_{s2} + A_{r2r2} \cdot I_{r2} + B_{r2s2} \cdot U_{s2}.$$

Разкривайки матриците и векторите, (4) ще се запише в следния вид:

$$m_1 \left(\begin{bmatrix} h_{r1d} \\ h_{r1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{111} & 0 \\ 0 & b_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{rd1} \\ u_{rq1} \end{bmatrix} \right) + m_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} h_{r2d} \\ h_{r2q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{112} & 0 \\ 0 & b_{222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{rd2} \\ u_{rq2} \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (5)$$

Т.к. $u_{rd1} = u_{rd2}$ и $u_{rq1} = -u_{rq2}$, съгласно (3), то проекциите на роторното напрежение ще се изчисляват чрез следните изрази:

$$u_{rd1} = \frac{-m_1 \cdot h_{r1d} - m_2 \cdot h_{r2d}}{m_1 \cdot b_{111} + m_2 \cdot b_{112}}; \quad u_{rq1} = \frac{-m_1 \cdot h_{r1q} + m_2 \cdot h_{r2q}}{m_1 \cdot b_{221} + m_2 \cdot b_{222}} \quad (6)$$

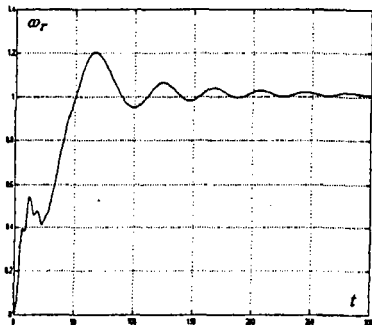
Уравненията за електромагнитните процеси (1) се допълват от уравнението на въртене на ротора:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{T_M} (M_{АСМ1} + M_{АСМ2} + M_{тур}); \quad (7)$$

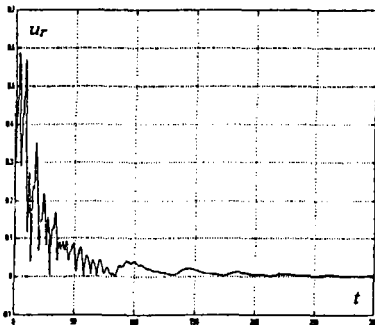
където: $M_{\text{ем}} = M_{АСМ1} + M_{АСМ2}$ - електромагнитния момент на вала, създаван от двете машини; $M_{тур}$ - момента на въздушната турбина; $M_{АСМj} = x_{adj} (i_{rdj} \cdot i_{qj} - i_{rj} \cdot i_{dj})$ $j=1,2$ - електромагнитния момент на отделната машина.

Моделиране на процесите във ветрогенератора

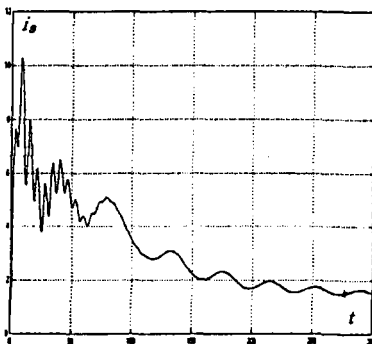
Отначало бяха изследвани режимите на работа на ветрогенератора при постоянни параметри на приложените напрежения към статорите u_{d1} ($u_{d1}=0,60$ е.е., $u_{q1}=0,80$ е.е.) и u_{d2} ($u_{d2}=0,6 \sin \omega_{k2} t$ е.е., $u_{q2}=0,8 \cos \omega_{k2} t$ е.е.), и при постоянен въртящ момент на турбината $M_{тур}=1,00$ е.е. На фиг.2-4 са показани измененията на скоростта на въртене на турбината ω_r , напрежението на ротора $u_r = \sqrt{u_{rd}^2 + u_{rq}^2}$, статорният ток на АСМ1 $i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}$ и електромагнитните моменти на АСМ1 и АСМ2.



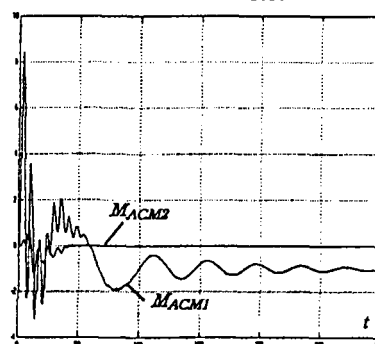
Фиг.2.



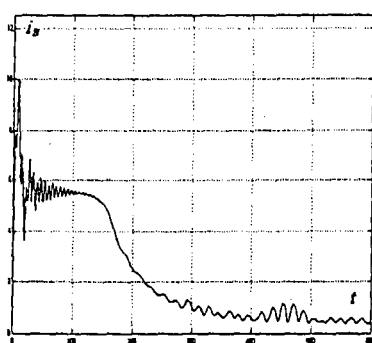
Фиг.3.



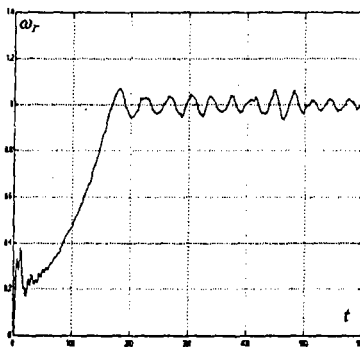
Фиг.4.



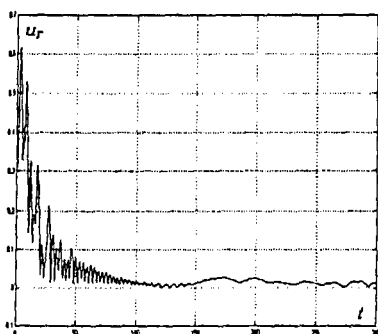
Фиг.5.



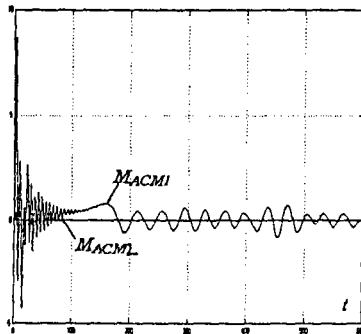
Фиг. 6.



Фиг. 7.



Фиг. 8.



Фиг. 9.

На фиг.6-фиг.9 са показани резултатите от симулацията на смущение, предизвикано от изменението на въртящия момент на въздушната турбина по синусоидален закон $M_{тур} = \sin(\omega t)$, където честотата на смущението $\omega = 2\pi f = 64 \text{ rad/sec}$.

Заклучение

Изследванията на математическия модел на ветрогенератора при различни режими на работа, показват неговата адекватност. Предложената схема на безчетков ветрогенератор на базата на АСМ е работеща и притежава редица предимства по сравнение с известните - надеждност, лесно и ефикасно управление.

Литература

1. А.И.Бертяков, С.Р.Мизюрин и др. Перспективы развития автономных систем генерирования переменного тока стабильной частоты. "Электричество", №10, 1988, с.28-39.
2. Н.Н.Блоцкий, И.А.Лабунец, Ю.Г.Шакарян. Машины двойного питания. Итоги науки и техники. Электрические машины и трансформаторы. Том 2. М., ВИНТИ, 1979, 122 с.
3. И.А.Лабунец, Л.Я.Шапиро. Дифференциальные уравнения бесконтактной асинхронизированной синхронной машины. "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", №6, 1980, с.68-76.
4. Н.Ф.Джагаров. Математическое моделирование процессов в каскадных соединениях электрических машин. "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", №3, 1991, с.82-95.