Computer Modelling & New Technologies, 1999, Volume 3, 102-107
Transport and Telecommunication Institute, Lomonosov Str.1, Riga, LV-1019, Latvia

ВКЛЮЧЕНИЕ АСИНХРОННОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА В СЕТЬ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

Н. ЛЕВИН, О. БЕЛАВИН, В. АГЕЕВ

Институт Транспорта и Связи, ул. Ломоносова, Рига, LV-1019, Латвия

Показан принцип управления включением ветрогенератора на параллельную работу с электрической сетью с предварительной нагрузкой ветродвигателя в процессе его разгона. Рассмотрен способ создания предварительной нагрузки с помощью ветрогенератора, работающего до включения в сеть в синхронном режиме. Изложены соображения по расчету тока возбуждения для синхронного режима.

It is shown principle of direction by engaging of induction generator to a parallel work with the electrical network with prior work during next time when it is taking a run. It is solved a method of prior work creation with a help from wind generator, which is working before engaging to a network in the synchronous condition. It is stated considerations how to calculate a current of excitation for the synchronous condition.

Рассматривается асинхронный генератор (АГ) с приводом от ветродвигателя (ВД). Система управления генератором автоматически подключает его на параллельную работу с сетью трехфазного переменного тока и отключает, если АГ переходит в режим двигателя. До включения в сеть генератор не возбужден. В рабочем положении угол установки лопастей ветроколеса фиксированный.

Для исключения динамических нагрузок на ВД в процессе включения асинхронного генератора система управления должна обеспечить подключение АГ к сети в момент, когда его угловая частота вращения Ω будет равна синхронной частоте вращения Ω_1. Синхронная частота вращения определяется частотой переменного тока сети f_1 и числом пар полюсов p асинхронной машины (АМ) $\Omega_1 = \dfrac{2\pi f_1}{p}$.

При скорости ветра равной или больше номинальной после подключения АМ к сети момент, развиваемый ВД, обеспечивает ее устойчивый генераторный режим.

Если скорость ветра будет меньше номинальной, то процесс включения и нагрузки генератора может оказаться неустойчивым. Момент ВД при такой скорости ветра может не преодолеть генераторный момент сопротивления, создаваемый АГ при нагрузке. В этом случае частота вращения вала АГ Ω будет уменьшаться и, соответственно, будет снижаться мощность, отдаваемая генератором. Если Ω станет меньше Ω_1 схема управления отключит АГ от сети. Поскольку генераторный момент сопротивления в этом случае будет снят, то ВД вновь увеличивает Ω и при $\Omega = \Omega_1$ схема управления опять подключит АГ к сети. Такой процесс кратковременного подключения и отключения генератора может повторяться до тех пор, пока скорость ветра не станет достаточной, при которой ВД обеспечит устойчивый генераторный режим АМ.

Таким образом, при малых скоростях ветра перевод АМ в генераторный режим после ее подключения к сети и устойчивая работа генератора возможна только при наличии начального избыточного момента ветродвигателя.

Момент, развиваемый ВД, согласно /1/ может быть представлен в виде:

$$M = \overline{M}\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}, \qquad (1)$$

где $\rho = 0{,}125$ кг·с^2/м^4 - плотность воздуха, R – радиус ветроколеса, м, V - скорость ветра, м/с,

$\overline{M}$ - относительный момент.

В свою очередь, $\overline{M}$ зависит от быстроходности ветроколеса $Z = \dfrac{\Omega R}{V}$.

При фиксированном угле установки лопастей ветроколеса $\overline{M}$ является функцией только скорости ветра и угловой частоты вращения ветроколеса. График $\overline{M}(Z)$ приведен на Рисунке1

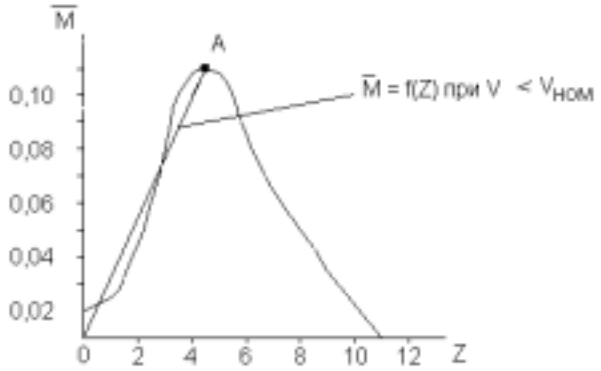

Рисунок 1. Аэродинамическая характеристика ветроколеса.

Кривую $\overline{M}(Z)$ при скоростях ветра $V < V_{ном}$ можно ориентировочно аппроксимировать прямой ОА (Рисунок1).

В этом случае закон изменения $\overline{M}(Z)$ будет удовлетворять выражению

$$\overline{M} = \frac{\overline{M}_{max}}{Z_{ном}} Z . \qquad (2)$$

В (2) $\overline{M}_{max} = 0,1$, что соответствует $Z_{ном} = 4,5$ и $V = V_{ном}$.

Подстановка (2), с учетом числовых значений, в (1) позволяет получить:

$$M = 0,011\pi R^4 \rho \Omega V . \qquad (3)$$

Из (3) следует, что при $V = Const$ $M \approx k_1\Omega$, а при $\Omega \approx Const$ (асинхронный режим при нагрузке генератора) $M \approx k_2 V$.

После включения АГ в сеть приближенное уравнение движения системы Ветродвигатель-генератор может быть записано в виде

$$M - M_r = J\frac{d\Omega}{dt} , \qquad (4)$$

где $M_r = M_{rs} + M_{cm}$ - момент, создаваемый генератором (M_{rs}-момент, зависящий от скольжения; M_{cm} - момент, обусловленный потерями в стали, $M_{cm} \approx Const$); J - приведенный момент инерции вращающихся масс.

Используя формулу Клосса, M_r можно представить в следующем виде:

$$M_{rs} = \frac{2M_m S_m S}{S^2 + S_m^2} . \qquad (5)$$

Здесь M_m - максимальный момент АГ; S_m-скольжение, соответствующее M_m; $S = \dfrac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$ - рабочее скольжение. Уравнение (4) с учетом (5) и заменой Ω в выражении $J\dfrac{d\Omega}{dt}$ через S принимает вид:

$$M - \frac{2 M_m S_m S}{S^2 + S_m^2} - M_{CT} = -J_{\Omega l} \frac{dS}{dt}. \qquad (6)$$

Из (6) следует, что при холостом ходе генератора $(S = 0)$ момент ВД должен уравновесить часть генераторного момента - $M_{CT.}$. Для перевода АМ в генераторный режим $(S \angle 0)$ ВД должен обладать запасом мощности, чтобы превысить синхронную скорость.

Операции включения АМ в сеть и перевода его в генераторный режим будут более надежны, если в процессе разгона ВД будет предварительно нагружен. В момент подключения АГ к сети предварительная нагрузка ВД должна быть заменена моментом сопротивления генератора. Таким образом, за счет избыточного момента ВД можно обеспечить перевод АМ в генераторный режим и устойчивую работу при нагрузке.

Предварительную нагрузку ветродвигателя можно осуществить используя эту же АМ в режиме синхронного генератора [2]. Для этого необходимо возбудить АМ, подключив любые две фазные обмотки статора к источнику постоянного тока. В этом случае в период разгона к ВД будет приложен момент сопротивления, создаваемый синхронным генератором, работающим в режиме короткого замыкания. В точке синхронизма статорная обмотка должна отключаться от источника постоянного тока и подключаться к сети трехфазного переменного тока. За счет этого дополнительного момента АМ устойчиво будет переходить в генераторный режим, отдавая в сеть активную мощность.

При уменьшении скорости ветра частота вращения вала ветродвигателя уменьшается и АМ, проходя точку синхронизма, может перейти в двигательный режим, потребляя мощность из сети. В этом случае АМ должна быть отключена от сети и вновь переведена в режим синхронного генератора.

Такой алгоритм управления ветрогенератором может быть реализован устройством, функциональная схема которого приведена на Рисунке 2 [2].

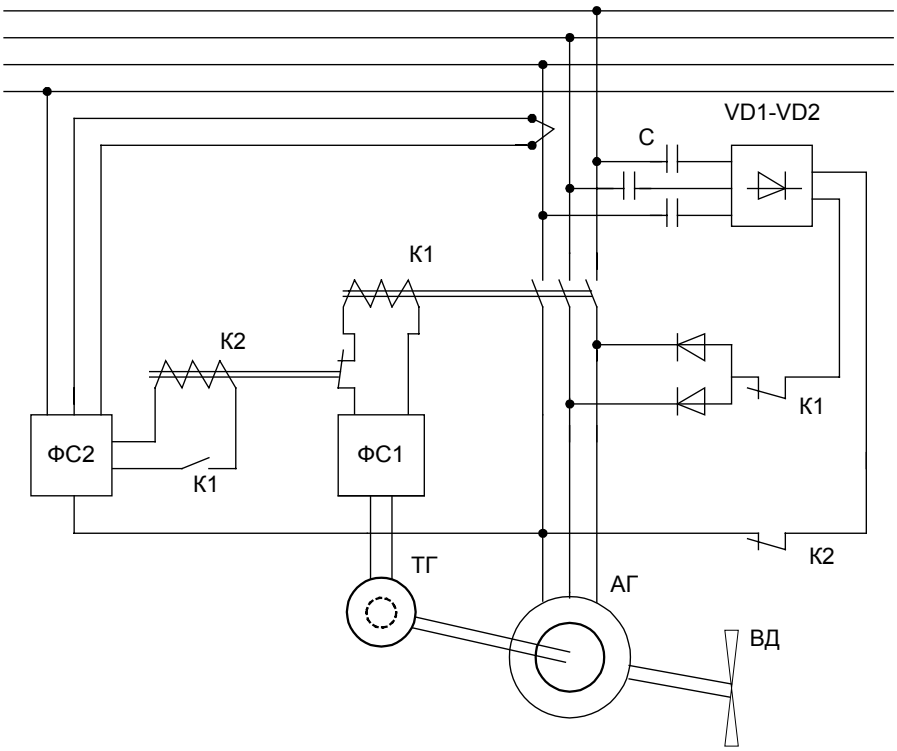

Рисунок 2. Функциональная схема управления асинхронным ветрогенератором.

При частотах вращения меньших синхронной обмотка контактора К1 обесточена и две фазных обмотки статора подключены к трехфазной сети через балластные конденсаторы С и выпрямительный мост VD1…VD6. В этом случае асинхронная машина работает как синхронный генератор и создает генераторный момент сопротивления, нагружая ветродвигатель.

Контроль за частотой вращения вала АГ осуществляется тахометрической системой, состоящей из синхронного тахогенератора ТГ и блока формирования управляющего сигнала ФС1 на включение АГ в сеть переменного тока. Как только частота вращения вала генератора достигнет синхронной частоты вращения, по сигналу с ФС1 сработает контактор К1. При этом размыкающие контакты К1 разорвут цепи питания обмотки статора постоянным током и одновременно своими замыкающими контактами К1 подключат статорную обмотку АМ к сети трехфазного переменного тока и подготовят цепь контактора К2, переводя его в ждущий режим. За счет дополнительного момента, которым предварительно был нагружен ветродвигатель, АГ переводится из режима холостого хода в устойчивый генераторный режим.

Ослабление скорости ветра приведет к уменьшению частоты вращения вала генератора, и, соответственно, - к уменьшению активной мощности, отдаваемой АГ. При переходе в двигательный режим направление потока активной мощности меняет свой знак, т.е. АМ начинает потреблять мощность из сети.

Изменение направления потока мощности воспринимается блоком формирования сигнала управления на отключение генератора от сети ФС2. По команде с ФС2 срабатывает контактор К2. Размыкающий контакт К2 обесточивает цепь питания катушки контактора К1, контакты которого переключаясь, отключат АГ от сети и вновь подключат его статорные обмотки к цепи постоянного тока, переводя АМ в режим синхронного генератора. В дальнейшем, в случае усиления ветра и, соответственно, увеличения частоты вращения ВД, процесс включения АГ на параллельную работу с сетью повторится.

Как показывает анализ, мощность предварительной нагрузки $P_{ПН}$, создаваемой на валу ВД, должна составлять 2…3% от номинальной мощности АГ. Для асинхронных машин мощностью 10…100 кВт это примерно соответствует сумме механических потерь и потерь в стали /3/, т.е. $P_{ПН} = П_{МЕХ} + П_{СТ} = (0{,}02...0{,}03)P_{НОМ}$.

Поскольку предварительная нагрузка на ВД создается асинхронной машиной, работающей как синхронный генератор, то возникает необходимость в определении величины постоянного тока возбуждения и соответствующего ему магнитного потока, при котором на валу машины развивается мощность $P_{ПН}$.

Сумму механических потерь и потерь в стали можно найти по кпд АМ из условия, что потери постоянные и переменные при номинальном режиме равны:

$$P_{ПН} \approx \frac{0{,}5(1-\eta)P_{НОМ}}{\eta}.$$

Если известны параметры АМ, то ориентировочное значение тока возбуждения I_B, который обусловливает на валу мощность $P_{ПН}$, может быть определено из следующего исходного уравнения:

$$P_{ПН} = \frac{m_1 U_1^2 r_2^1 \kappa^2}{r_2^{12} + x_2^{12}}, \qquad (7)$$

где

$$K = \sqrt{\frac{0{,}5\,P_{НОМ}(1-\eta)(r_2^{12} + x_2^{12})}{m_1 \eta U_1^2 r_2^1}} = \frac{I_B}{I_0}. \qquad (8)$$

Здесь m_1 - число фаз обмотки статора; r_1, r_2^1 - активное сопротивление фазы статора и приведенное активное сопротивление ротора; x_2^1 - приведенное индуктивное сопротивление фазы ротора; η - кпд АМ; $\boldsymbol{I_0}$ - ток холостого хода АМ.

Из выражения (8) следует, что $\boldsymbol{I_B}$=К$\boldsymbol{I_0}$. По значению $\boldsymbol{I_B}$ находят величину балластных сопротивлений в фазах на входе выпрямителя (Рисунок 2) и емкостей конденсаторов С.

На Рисунок 3 показан фрагмент цепи статора АГ, фазные обмотки которого соединены в треугольник. Для этого случая значение выпрямленного тока, протекающего в фазной обмотке $\boldsymbol{I^I_b}$ составляет 0,5 $\boldsymbol{I_B}$.

Ток фазы на входе в выпрямитель: $I_Ф = \sqrt{\frac{2}{3}} I_B$. Фазное напряжение на входе выпрямителя: $U_Ф = \frac{U_B}{2{,}34}$. Падение напряжения на емкостном сопротивлении:

$U_C = \sqrt{U_1^2 - \left(\frac{U_B}{2{,}34}\right)^2}$, где U_1 - фазное напряжение сети.

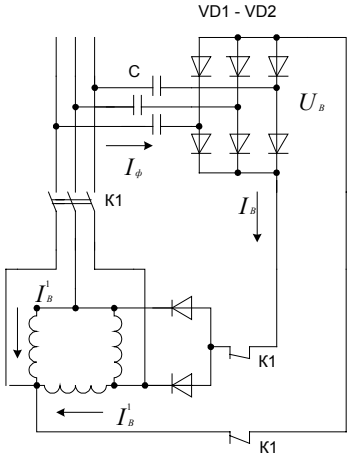

Рисунок 3. Фрагмент электрической схемы управления и цепи статора АГ.

По известным $I_Ф$ и U_C определяется величина емкости: $C = \frac{I_Ф 10^6}{U_C 2\pi f_1}$.

В процессе настройки схемы управления предварительной нагрузкой значения тока возбуждения I_B и емкости С должны быть уточнены.

Если для определения значения I_B параметры АГ неизвестны, то их можно приближенно оценить расчетным путем по паспортным данным АМ и справочным сведениям о перегрузочной способности АМ даннного типа. Параметры АМ определяются по известной методике.

- По формуле Клосса находится критическое скольжение:

$s_m = s_{НОМ}\left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}\right)$, где $\lambda_m = \frac{M_m}{M_{НОМ}}$ - коэффициент перегрузки.

- Используя коэффициент кратности пускового тока λ_i, находят значение пускового тока:

$I_K = \lambda_I I_{НОМ}$.

- Находится активное сопротивление короткого замыкания и приведенное активное сопротивление ротора

$r_K = r_1 + r_2^1 = \frac{P_{НОМ}(1-\eta)}{2\eta I_K^2}$. Поскольку $r_2^1 \approx r_1$, то $r_2^1 = \frac{r_K}{2}$.

- Определяется индуктивное сопротивление короткого замыкания и приведенное индуктивное сопротивление ротора $x_K = x_1 + x_2^1 \approx \frac{s_m}{r_2^1}$. Так как $x_2^1 \approx x_1$, то $x_2^1 = \frac{x_K}{2}$.

В дальнейшем ток возбуждения I_B и емкости конденсаторов C определяется по вышерассмотренной методике.

Литература

[1] Шефтер Я.И. (1975) Использование энергии ветра. Энергия, Москва
[2] Agejevs V., Belavins J., Levins N., Ostapenko J., Roļirs J.. (1998) Asinhronā vējģenerātora regulēšanas iekārta un paņēmiens. Latvijas Republikas Patents №12031, publ. 20.05.
[3] Петров Г.Н. (1963) Электрические машины, ч.2. Госэнергоиздат, М.-Л..

Received on the 15th of December 1999