

双馈风力发电机的小信号稳定分析及其控制研究

洪敏, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电网对直接并网的兆瓦级风电场的要求已经从电能质量进一步发展到暂态稳定、事故后自动恢复、调频调压、直接调度等,因而功率输出平稳,可调性强的双馈入异步风力发电机逐渐成为主流风机。双馈入异步发电机由于采用磁场定向的矢量变换控制技术,通过对用于励磁的 PWM 变频器各分量电压、电流的调节,从而实现发电机有功和无功的解耦控制。因此建立了双馈入风力发电机的详细模型,制定相应的控制策略,并通过小信号法和动态仿真对双馈入风力发电机的小扰动稳定进行分析 and 评估。

关键词: 双馈入电机; 并网风电场; 小信号稳定; P-Q 解耦控制

Analysis of small-signal stability and control strategy of the grid integrated wind plant based on DFIG

HONG Min, LI Xing-yuan

(School of Electric Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The prompt development of wind power is put forward even more requirement for the direct grid integration of MW wind generation plant such as transient stability, automatic recovery after faults, modulation of frequency and voltage, direct dispatch, etc. Hence the DFIG with smooth output and good controllability is the dominating wind turbine. The decoupled P-Q control is well implemented by DFIG based on PWM vector via the modulation of rotor d-q current. Therefore, the detailed model of the power plant based on DFIG and corresponding control strategy is established. The small-signal stability is studied and assessed via a small-signal analysis, which is further verified by dynamic simulation.

This project supported by National Natural Scientific Foundation of China (No.50577044) and Innovation foundation of Sichuan University.

Key words: doubly-fed induction generation; integrated wind plant; small-signal simulation; decoupled P-Q control

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)14-0001-06

0 引言

近 20 年,发达国家在风力发电技术领域已经取得巨大成就。并网运行的风力发电机组单机容量从数十千瓦级已发展到兆瓦级;控制方式从基本单一的定桨距失速控制向全桨叶变距和变速恒频发展,预计在最近几年将推出智能风力发电机组;运行可靠性从 20 世纪 80 年代初的 50% 提高到 98% 以上,并且在风电场运行的风力发电机组全部可以实现集中控制和远程控制^[1~3]。

由于实时风电场需要高度的可控性,变速恒频风力发电机组将成为大型并网风力发电机组的主流机型。变速发电机目前主要采用双馈入异步发电机 DFIG。基于 DFIG 的变速恒频风电机组具有高度的可控性:低风速下时能够根据风速变化,在运行中保持最佳叶尖速比以获得最大风能;高风速时利用

风轮转速的变化储存或释放部分能量,提高传动系统的柔性,使功率输出更为平稳。

本文建立联网运行的双馈入风力发电机的详细动态模型,通过小信号分析,对所研究系统进行小扰动稳定评估,分析可能发生的振荡模态及其机理,研究其控制方法和原理,并且通过对联网双馈入风电机组的动态仿真进行分析和验证。

1 双馈入风力发电机的控制

图 1 为本文研究的并网双馈入风力发电机组,由 6 台 1.5 MW 双馈入发电机构成,并且等效为一台机,通过 575 kV 母线与交流系统相连,并且在母线出口处接 500 kW 的当地负荷,如图 1 所示。 P_s 为定子侧向电网输送的有功, Q_s 为定子无功, P_r 为转子通过换流器输送的有功。在忽略定、转子绕组铜耗条件下,有 $P_r \approx sP_s$, s 为转差率。当发电机处于亚同步状态时, $s > 0$, $P_r > 0$, 变频器向转子绕组输入电功率;当发电机处于亚超步状态时, $s < 0$,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50577044); 四川大学创新基金项目

$P_r < 0$, 变频器向转子绕组输入电功率。机组各参数见附表所示。

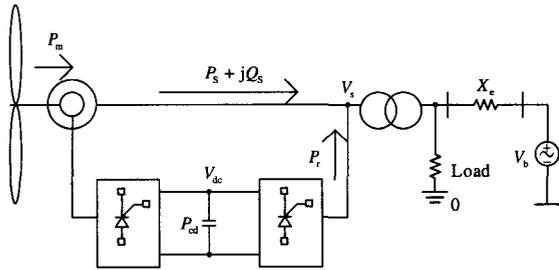


图 1 并网双馈入风电机组结构图

Fig. 1 Structure of the grid integrated DFIG wind turbine

根据风力发电机组在不同区域运行, 将基本控制策略定为: 在低于额定风速时, 跟踪 C_{pmax} 曲线, (C_p 为风能利用系数, 即风力机实际获取的轴功率与风能之比, 见式 (1)) 以获得最大能量; 高于额定风速时, 跟踪 P_{max} 曲线, 并保持稳定输出。

a. 桨间节距控制

额定风速以下是风力发电机组的运行不受功率限制的风速范围。在这一运行区域, 风力发电机组控制系统的任务主要是通过对转速的控制来跟踪最佳 C_p 曲线以获得最大能量, 其函数表达式如下所示:

$$C_p(\theta_p, \lambda) = c_1[c_2/\lambda - c_3 \cdot \beta - c_4] \times e^{-c_5/\lambda} + c_6 \times \lambda \quad (1)$$

$$\text{其中: } \lambda_t = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (2)$$

λ 为叶尖速比即 $\lambda = \Omega / V_w$, Ω 为风轮转速 (rad/s), β 为桨距角即受控量。桨间节距角控制采用带前馈补偿环节的比例控制器, 并且实行死区和限速控制。

b. 转子侧换流器控制

转子侧换流器控制目标为: 当风速大于额定值时, 合理调节空气动力转矩; 使增速箱的尖峰转矩最小化; 避免不必要的桨叶节距变化, 提高风力机的使用寿命。由于转子电流控制器的动作时间在毫秒级以内, 变桨距机构的动作以秒计, 因此在短暂的风速变化时, 仅仅依靠转子电流控制器的控制作用就可以保持发电机功率的稳定输出, 减少对电网的不良影响。

换流器 VSC 部分采用基于滑差锁相环的无传感器 P-Q 解耦控制技术。PLL 的核心是电压控制振荡器 VCO, VCO 利用负反馈环节通过改变自身频率 ω_x 以及相角 θ_x 来跟踪定子频率 ω_s 和定子相角 θ_s , 如图 2 所示^[4,5]。采用双通道分别控制双馈发电机定子 (或转子) 转矩电流分量和励磁电流分量的办法, 其中转矩电流分量是采用定子有功功率外环、电流内环的双闭环控制方式。由于矢量控制解耦, 电机转速只受发电机定子 (或转子) 转矩电流分量的控制。将转子电流通过 d-q 变换分解为 dq 轴分量, 即可通过调整转子电流的 d 轴分量来控制电磁转矩或有功功率, 而电压或者无功功率则可通过 q 轴分量来控制, 从而实现有功和无功功率的解耦控制, 如图 3 和图 4 所示。

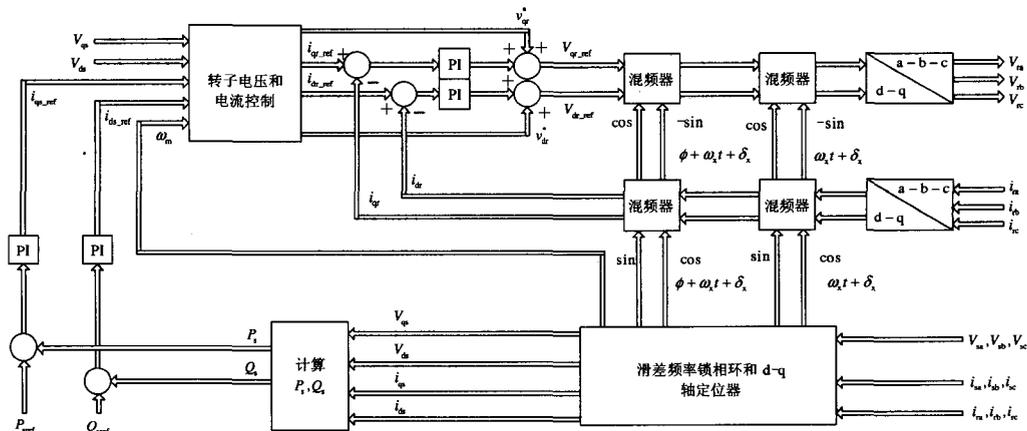


图 2 VSC 控制结构图

Fig. 2 Structure of the VSC control strategy

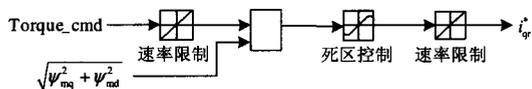


图 3 转子侧换流器有功控制环节
Fig. 3 Active control loop of the rotor side converter

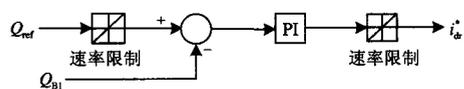


图 4 转子侧换流器无功控制环节
Fig. 4 Reactive control loop of the rotor side converter

电流调节器必须能够实现快速控制, 这样定子侧换流器才能对于外环控制表现为一个电流源。电流调节可以采用非线性控制, 比如两端到三端控制器, 也可采取线性控制, 如带前馈补偿的 PI 控制器, 临界阻尼控制器, 或者是基于模型的空间状态临界阻尼控制器。为了实现方便迅速的控制, 本例采用带前馈补偿环节的 PI 控制器。PI 控制器中比例积分系数 K_p 和 K_i 的稳定数值范围由闭环传递函数的劳斯稳定判据来确定^[6]。

2 双馈入风力发电机的建模

1) 风力机模型

假定风力机的偏航系统已经将风力发电机组的主轴调整到与风向垂直的方向, 自然风速采用下式模型^[7]:

$$V_{\text{wind}} = V_{\text{base}} + A \sin(\omega t) + V_{\text{noise}} \quad (3)$$

式中: V_{wind} 为输入到仿真系统中的风速, V_{base} 为平均风速, A 为正弦调制振幅, 为均值为零方差为 1 的白噪声。

风力机从风能中捕获的功率为^[8]:

$$P_t = \begin{cases} 0 & V_w \leq V_{\text{in}} \\ \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V_w^3 & V_{\text{in}} \leq V_w \leq V_R \\ P_R & V_R \leq V_w \leq V_{\text{out}} \\ 0 & V_w \geq V_{\text{out}} \end{cases} \quad (4)$$

其中: V_{in} 、 V_R 、 V_{out} 分别为启动风速、额定风速以及切出风速, V_R 为风力发电机的额定功率, P_t 为风轮吸收功率, ρ 为空气密度 (kg/m^3), R 为风轮半径 (m), $C_p(\beta, \lambda)$ 为风能利用系数。

2) 双馈入异步电机模型

DFIG 的定子与保护开关和变压器相连后接入主网, 转子通过两个背靠背的六脉波 IGBT 换流器与主网连接, 通过调节转子电流来实现电压和功率控制。

在 dq 坐标系下双馈入电机的方程为^[9]:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qs} \quad (5)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{ds} \quad (6)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qr} \quad (7)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{dr} \quad (8)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (9)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (10)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (11)$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (12)$$

其中: (加上其他变量的说明), ω_s 为同步转速, ω_r 为转子转速, s 为滑差, 则有 $\omega_s - \omega_r = s \omega_s$,

$$L_s = L_{ss} + L_{ms} - L_{ms}, \quad L_m = L_{sr}.$$

在稳定分析中, 发电机通常被看作暂态阻抗下的电压源。通过重新定义变量 v'_q, v'_d, X'_s 以及 T'_0 , 如下所示:

$$v'_q = \frac{L_m \omega_s (L_r i_{dr} + L_m i_{ds})}{L_r} \quad (13)$$

$$v'_d = -(L_m / L_r) \omega_s (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \quad (14)$$

$$X'_s = \omega_s (L_s L_r - L_m^2) / L_r \quad (15)$$

$$T'_0 = \omega_s L_r / R_r \quad (16)$$

于是, 式 (5) ~ (11) 改写为:

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{\omega_b \omega_s (R_s T'_0 + X_s - X'_s)}{X'_s T'_0} i_{qs} + \omega_b \omega_s i_{ds} + \quad (17)$$

$$\frac{(1-s)\omega_b \omega_s v'_q}{X'_s} - \frac{\omega_b \omega_s v'_d}{T'_0 X'_s} - \frac{\omega_b \omega_s v_{qs}}{X'_s} + \frac{L_m \omega_b \omega_s v_{qr}}{L_r X'_s}$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{\omega_b \omega_s (R_s T'_0 + X_s - X'_s)}{T'_0 X'_s} i_{ds} + \frac{\omega_b \omega_s L_m v_{dr}}{X'_s L_r} + \quad (18)$$

$$\frac{\omega_b \omega_s v'_q}{T'_0 X'_s} + \frac{\omega_b \omega_s (1-s)}{X'_s} v'_d - \frac{\omega_b \omega_s v_{ds}}{X'_s} - \omega_b \omega_s i_{qs}$$

$$\frac{dv'_q}{dt} = \frac{(X_s - X'_s) \omega_b \omega_s i_{ds}}{T'_0} - \frac{\omega_b \omega_s v'_d}{T'_0} + \quad (19)$$

$$s \omega_b \omega_s v'_d - \frac{L_m \omega_b \omega_s v_{dr}}{L_r}$$

$$\frac{dv'_d}{dt} = \frac{(X_s - X'_s) \omega_b \omega_s i_{qs}}{T'_0} - \frac{\omega_b \omega_s v'_q}{T'_0} - \quad (20)$$

$$s \omega_b \omega_s v'_q + \frac{L_m \omega_b \omega_s v_{qr}}{L_r}$$

$$i_{qr} = -(1/\omega_s L_m) v'_d - (L_m / L_r) i_{qs} \quad (21)$$

$$i_{dr} = -(1/\omega_s L_m) v'_q - (L_m / L_r) i_{ds} \quad (22)$$

$$\psi_{qs} = -(1/\omega_s) v'_d + (X'_s / \omega_s) i_{qs} \quad (23)$$

$$\psi_{ds} = (1/\omega_s) v'_q + (X'_s / \omega_s) i_{ds} \quad (24)$$

双馈入电机的电磁转矩方程为:

$$T_e = (V'_d / \omega_s) i_{ds} + (v'_q / \omega_s) i_{qs} \quad (25)$$

3) 轴系模型

将轴系模型简化, 可得:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{2H\omega_s} (T_m - T_e - F\omega_s + F\omega_s s) \quad (26)$$

其中: T_e 为电磁转矩, H 为转动惯量, T_m 、 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩, F 为叶片阻尼系数。

4) 换流器及直流联络线模型

在此, 考虑直流联络电容的动态行为, 则有:

$$I_{dc} = \frac{P_{dc}}{v_{dc}} = C \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (27)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{P_{dc}}{v_{dc}C} \quad (28)$$

假设双馈入风力发电机的出线潮流为 P_{grid} ，则有双馈入电机流入交流网络的有功功率为定子与转子的有功之和减去直流联络电容的充电功率（忽略换流器损耗及线路损耗），即有：

$$P_{grid} = P_s + P_r - P_{dc} = \sqrt{v_{qs}^2 + v_{qs}^2} v_b \sin \gamma / X_e \quad (29)$$

$$Q_{grid} = Q_s = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} \quad (30)$$

$$P_s = v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} \quad (31)$$

$$P_r = v_{qr} i_{qr} + v_{dr} i_{dr} \quad (32)$$

其中： X_e 为双馈入发电机所连交流系统的等值阻抗。设与风力发电机联网的交流系统远端母线的电压为 $v_b \angle 0^\circ$ 。将式 (21)，(22)，(31)，(32)，(29)，(30) 代入 (25) 中，可得到有关变量 v_{dc} 的微分方程：

$$\begin{aligned} \frac{dv_{dc}}{dt} = & \frac{v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} - \sqrt{v_{qs}^2 + v_{qs}^2} v_b \sin \gamma / X_e}{C v_{dc}} - \\ & \frac{v_{qr} (v_d' / \omega_s L_m + i_{qs} L_m / L_r)}{C v_{dc}} - \\ & \frac{v_{dr} (v_d' / \omega_s - i_{qs} X_e' / \omega_s)}{C v_{dc}} \end{aligned} \quad (33)$$

再结合方程 (17)，(18)，(19)，(20)，(26)，(33) 和 (29)，(30)，得出了一组微分方程和一组代数方程：

$$\dot{x} = f(x, z, u) \quad (34)$$

$$g(x, z, u) = 0 \quad (35)$$

其中： $x = (i_{qs}, i_{ds}, v_q, v_d, s, v_{dc})$ 为状态向量（状态向量用方括号）， $z = (v_{qs}, \gamma)$ 为代数变量， $u = (v_{qr}, v_{dr})$ 为控制输入信号。

将同步旋转坐标系下的 d 轴准确定向于电网电压空间矢量方向上，则有约束条件为： $v_d = v_s$ ， $v_q = 0$ 。若采用恒功率坐标变换，则电网处有功功率、无功功率可以表示为：

$$\begin{cases} P_{grid} = v_d i_d + v_q i_q = v_d i_d \\ Q_{grid} = v_q i_d - v_d i_q = -v_d i_q \end{cases} \quad (36)$$

变速恒频双馈入风电机组一般采用恒功率因数控制运行方式，即恒功率因数。DFIG 的 P-Q 容量极限受到各个部件的限制，其中转子电流对其限制最为严格。根据之前各公式可推导出：

$$P_s^2 + (Q_s + \frac{v_s^2}{x_{ss}})^2 = \frac{v_s^2 x_m^2}{x_{ss}^2} I_r^2 \quad (37)$$

DFIG 的功率极限近似为一个以 $(0, -\frac{v_s^2}{x_{ss}})$ 为圆

心，以 $\frac{v_s x_m}{x_{ss}} I_{rmax}$ 为半径的圆，风电机组的功率因数负向调节范围大于正向调节范围。

3 小信号分析及初始化

小信号稳定最常用的方法就是特征值分析法。首先在计算出给定运行情况下各个变量的稳态值，然后将 (34)，(35) 在初始运行点线性化，得：

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x + B\Delta u \quad (38)$$

DFIG 动态模型的仿真结果和动态特性分析结论依赖于动态仿真中初值的给定。而动态 DFIG 模型进行初始化，还包括了转子暂态电流。对于降阶的 DFIG 模型来说，还要通过求解转子电压 v_d, v_q 对暂态电抗下的电压 v_d', v_q' 进行初始化。本文采用直接解法来确定系统在正常情况下的初始运行状态。并且通过借助计算机并以数值分析为基础的时域仿真，来得到系统在一定扰动下的时域变化情况。这样就能够得到计及系统非线性因素情况下的运行状态^[12]。初值求解步骤如下：

- 1) 假设风电机组定子端出口电压为额定电压，即 $v_s = 1 \angle 0^\circ$ 。
- 2) 根据风速变化规律读入初始风速。
- 3) 由风机功率特性曲线计算风电机组有功功率总输出 P_{grid} 。
- 4) 由转速特性曲线计算该有功功率 P_{grid} 下的转差率 s 。
- 5) 读入定子侧给定的功率因数 $\cos \varphi$ ，按照上式计算出风电机组定子端有功功率和无功功率，转子端有功功率和无功功率，继而求出风电机组的各个电气量，以此确定稳定的工作状态量作为动态仿真初值。

通过计算给出系统初始值(p.u.)，如表 1 所示。

表 1 系统初始运行状态
Tab.1 Initial system state

V_{s0}	I_{s0}	V_{r0}	I_{r0}	P_{grid0}	Q_{grid0}	T_{m0}
1	0.975	0.214	0.817	0.872	0.675	0.99

通过计算得出系统特征根，如表 2 所示。从表 2 可见，双馈入风力发电机存在快速（高于基频）以及低频的振荡模态以及非振荡（特征根为负实数）

模态。直联电压以及转子磁链的 d 轴分量决定了双馈入电机的非振荡模态。而定子电流, 风轮机转速, 发电机转子转速, 以及转子磁链的 q 轴分量决定了双馈入风力发电机的振荡模态。由于发电机运行在超同步状态, 且考虑了定子的暂态分量, 所以出现高于基频的快速振荡模态。风电机组的快速振荡模态跟所连接的交流系统的强弱有关, 随着交流系统强度的减弱, 快速振荡模态所对应的频率也会相应的增加。本文所研究的风力发电系统在其运行点附近是小信号稳定的。

表 2 系统特征根

Tab.2 Characteristic roots of the system

	δ	ω	ξ	f_{osc}
λ_1	-29.6	0	1	0
λ_2, λ_3	-26.32	431.03	0.0609	68.6
λ_4, λ_5	-19.43	34.12	0.495	5.43
λ_6	-23.73	0	1	0

4 系统仿真

风电机组采用定功率因数控制, 设其给定功率因数 $\cos \varphi = 1$ 。输入风速的模型如式 (1) 所示, 其中的平均风速部分由一个阶跃信号来表示, 即在第三秒时平均风速由 8 m/s 阶跃为 18 m/s, 如图 5 所示。当风速突变时, 速度控制环节使得叶片功角发生改变, 减少风轮能量吸入, 在 14 s 处风力发电机组的输出功率达到额定值 9 MW; 转子电流控制器调节发电机转差率, 以保证发电机输出功率的稳定。

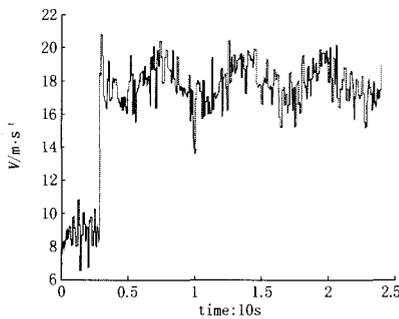


图 5 输入风速波形

Fig. 5 Waveform of the input wind speed

(1) 系统的电压扰动响应模拟

双馈入风电机组与传统的发电机一样, 其电压可以通过本身的电力电子设备进行连续控制和调整。风电机组能在电网需要时, 瞬间完成向电网提供无功, 调节系统电压, 稳定脆弱的电网。模拟交流系统远端在 20 s 时电压下降了 0.15 p.u., 持续时间为 0.5 s 和频率波动时, 变速恒频双馈入风电机组的响应。

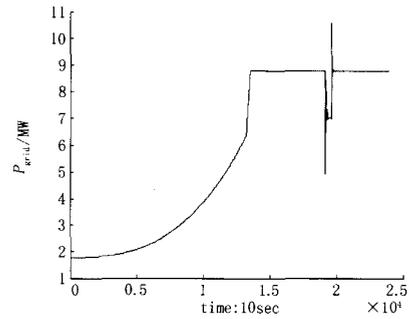


图 6 风力发电机有功出力

Fig.6 Active power output of wind turbine

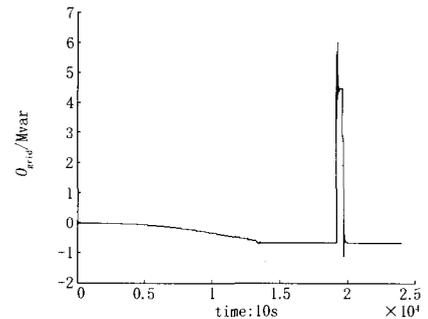


图 7 风力发电机无功出力

Fig.7 Reactive power output of wind turbine

图 6 和图 7 分别为风电机组端口输出的无功和有功功率, 图 8 为发电机组母线电压波形。由图中看出, 在电网电压下降的瞬间, 双馈入风电机组的无功由 -0.7 Mvar 瞬间增大到 6.17 Mvar。而在风电机组输出无功大幅度增加时, 由于受 DFIG 的转子电流限制, 有功输出会相应地减少, 而在无功减少时, 有功则会相应增加。

(2) 改变风电场线路阻抗的系统相应模拟

风电机组连接主网的线路阻抗大小表示风电机组与系统联系的紧密程度。但弱加长送端与受端即风力发电机与交流系统之间的电气距离时, 即使是在无扰动情况下, 系统的稳定会大大降低。以下只列出发电机母线电压波形, 如图 8 所示。

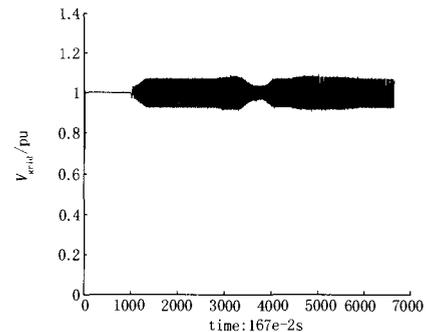


图 8 风力发电机母线电压 (增加电气距离)
Fig. 8 Bus voltage of wind turbine (with increased electrical distance)

5 结论

本文通过建立双馈入电机的非线性动态模型，并且进行小信号分析，对联网双馈入风力机的动态稳定性进行了评估和验证。而仿真结果表明，通过采用基于 d-q 锁相技术的 PLL 无传感器 P-Q 解耦控制技术实现了 DFIG 的功率调节功能，并为系统提供了有效的无功支持。

提高电力系统小信号稳定的主要方法有：在输电网络中均匀分布潮流，减少送端与受端之间的电气距离，采用轻型直流输电及 FACTS 元件，采用附加控制，如适应性控制，模糊逻辑控制等^[13,14]。由于适应性控制算法每一步的计算量都比简单 PI 控制器多得多，因此用于需要增加额外的设备及开发费用，其实用性仍在进一步探讨中。基于模糊逻辑控制的智能控制技术也引入到变速风电机组控制系统，将在后面的工作展开这方面的研究。

附表：

附表 1 交流电网参数

Appendix.1 The parameters of the AC network

ω_s	1	[pu]
ω_b	$2\pi \times 60$	rad/s
V_b	1	[pu]

附表 2 发电机参数

Appendix.2 The parameters of the generator

P_{nom}/VA	V_n/V_{rms}	f_n/Hz	R_s	L_s
e7	575	60	0.00706	0.171
R_r	L_r	L_m	H_s	$F/p.u$
0.005	0.156	2.9	5.04	0.01

附表 3 换流器参数

Appendix.3 The parameters of the converter

$P_{conmax} (p.u)$		$L_g (p.u)$	$R_g (p.u)$
0.5		0.15	0.15/100
V_{dnom}	C_{cd}	R_{RL}	L_{RL}
1200	$6 \times 10000e-6$	0.003	0.3

附表 4 叶轮机参数表

Appendix.4 The parameters of the turbine

P_{mnom}/W	桨距角控制比例系数/ K_p	最大桨距角 /deg	桨距角最大变化率 /deg · s ⁻¹
$6 \times 1.5e6$	500	45	2

附表 5 桨叶参数表

Appendix.5 The parameters of the blade

G_t	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
0.517 63	116	0.4	5	21	0.006 795

参考文献

[1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

YE Hang-zhi. The Control Technology of Wind Power Machines[M]. BeiJing: China Machine Press, 2006.

[2] 王建, 李兴源. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 24(25): 90-97

WANG Jian, LI Xing-yuan. Power System Research on Distributed Generation Penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 24(25): 90-97.

[3] 李蓓, 李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力, 2005, 16(3): 45-49.

LI Bei, LI Xing-yuan. Distributed Generation Sources and Their Effects on Distribution Networks[J]. International Electric Power for China, 2005, 16(3): 45-49.

[4] Baike Shen, Boon-Teck Ooi. Novel Sensorless Decoupled P-Q Control of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) based on Phase Locking to $\gamma - \delta$ Frame[A]. In: 2005 IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists[C]. 2670-2675.

[5] Shen B, Low V, Ooi B T. Slip Frequency Phase Lock Loop (PLL) for Decoupled of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)[A]. In: The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society[C]. 2004. 80-85.

[6] Kar N C, Jabr H M. A Novel PI Gain Scheduler for a Vector Controlled Doubly-Fed Wind Driven Induction Generator[J]. Electrical Machines and Systems, 2005: 948-953.

[7] 王秋谨, 张新房. 基于 WLS-SVM 的变速风力机有效风速估计[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1590-1593.

WANG Qiu-jin, ZHANG Xin-fang. Effective Wind Speed Estimation for Variable Speed Wind Turbines Based on WLS-SVM[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1590-1593

[8] 吴光学, 张学成, 殷永华, 等. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.

WU Wue-guang, ZHANG Xue-cheng, YIN Yong-hua, et al. Application of Models of The Wind Turbine Induction Generators (WTIGs) to Power System Dynamic Stability Analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 68-72.

[9] Morren J, de Haan S W H. Ridethrough of Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generator During a Voltage Dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.

[10] Mei F, Pal B C. Modelling and Small-Signal Analysis of a Grid Connected DFIG[A]. In: Power Engineering Society General Meeting, IEEE[C]. 2005: 1-8.

[11] 李强, 袁越, 周海强. 浅谈电力系统低频振荡的产生机理、分析方法及抑制措施[J]. 继电器, 2005, 33(9): 78-84.

LI Qiang, YUAN Yue, ZHOU Hai-qiang. A Brief Review of the Causes Analysis Methods and Restraining Measures of Low Frequency Oscillation in Power System[J]. Relay, 2005, 33(9): 78-84.

断;

f. 重复 e, 直至所有联络开关都进行调整后, 记下此次最小网损 ΔP_1 ;

g. 回到 a、b 两步, 进行网络结构调整, 合上不同于 c 步的另一联络开关, 并打开此次电压较高一侧的分段开关形成新的网络, 之后重复 c、d、e、f 各步, 记下此次最小网损 ΔP_2 ;

h. 重复 g 步, 直至所有联络开关都进行调整后, 分别记录下各次最小网损 $\Delta P_3, \dots, \Delta P_n$;

i. 比较所有各次的最小网损, 取出其中相对最小网损 ΔP_{\min} 所对应的配网结构, 就是所求最优网络结构。

4 结论

降低配电网网损一直是电力企业努力的方向, 在我国城网 110 kV 以下配电网线损占总线损的 60%, 可见降低配电网线损依然是降损工作的关键问题之一。

本文算法以网损最小为目标对每一个联络开关进行搜索来优化配电网网络结构, 可得到的配网结构是配电网网损最小的全局最优解。但是因为降低网损必须是一个既经济又实时的工作, 因此有许多可研究之处, 特别是网络重构的研究, 通过深入研究网络重构降低配电网网损而不断改进算法, 更有效地应用到配电网网络规划及实时系统中去以达到配电网优化的效果。

参考文献

- [1] 孙健, 江道灼. 一种多目标配电网网络重构新算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 57-61.
SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A New Multi-Objective Algorithm for Distribution Network Reconfigura-

tion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 57-61.

- [2] 刘健. 变结构耗散网络——配电网自动化新算法[M]. 北京: 水利水电出版社, 2000.
LIU Jian. Structure Variable Dissipated Network——New Algorithm to Distribution System Automation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 2000.
- [3] 刘健, 程红丽, 毕鹏翔. 配电网的简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(20): 77-82.
LIU Jian, CHENG Hong-li, BI Peng-xiang. A Simplified Model for Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(20): 77-82.
- [4] 唐志平. 供配电技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 15-44.
TANG Zhi-ping. Technology of Provide Power Distribution[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 15-44.
- [5] 余贻鑫, 邱炜, 刘若沁. 基于启发式算法与遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 19-22.
YU Yi-xin, QIU Wei, LIU Ruo-qin. Distribution System Reconfiguration Based on Heuristic Algorithm and Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 19-22.
- [6] 张锋, 江道灼. 特殊配网接线负荷均衡改进算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(12): 61-65.
ZHANG Feng, JIANG Dao-zhuo. An Improved Algorithm Solving Load Balancing of Special Distribution Network Connection[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2003, 15(12): 61-65.
- [7] 熊虎岗, 龚乐年, 刘海涛. 变结构耗散网络中负荷均衡优化改进算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 49-53.
XIONG Hu-gang, GONG Le-nian, LIU Hai-tao. Improved Load Balancing Algorithm in Structure-Variable Dissipated Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 49-53.

收稿日期: 2006-12-07; 修回日期: 2007-01-22

作者简介:

唐群纲(1979-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化系统和配电网管理软件的设计。E-mail tangqungang@163.com

(上接第 6 页 continued from page 6)

- [12] Holdsworth L, Wu X G, Ekanayake J B, et al. Direct Solution Method for Initialising Doubly-Fed Induction Wind Turbines in Power System Dynamic Models[J]. Proceedings of IEE Gener, Trans and Distrib, 2003, (5): 334-342.
- [13] 刘隽, 李兴源. 互联网低频振荡的相关问题及其研究[J]. 继电器, 2005, 33(16): 70-77, 84.
LIU Jun, LI Xing-yuan. Research and Problems of Low Frequency Oscillation in Interconnected Power Networks[J]. Relay, 2005, 33(16): 70-77, 84.
- [14] 马晓光, 孟伟. 模糊控制技术在电动机节能中的应用[J]. 继电器, 2001, 29(1): 34-35, 49.

MA Xiao-guang, MENG Wei, ZHU Chang-dong. Application of Fuzzy Control Technique in Energy Saving of Motor[J]. Relay, 2001, 29(1): 34-35, 49.

收稿日期: 2007-01-15; 修回日期: 2007-03-06

作者简介:

洪敏(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: jasmine508@163.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。