

变速恒频双馈风电机组分段分层控制策略的研究

李晶, 武鑫, 赵斌, 许洪华

中国科学院电工研究所, 北京市海淀区 100083

RESEARCH ON SUBSECTION AND LAYER CONTROL STRATEGY OF DOUBLY-FED VARIABLE SPEED WIND TURBINE

Li Jing, Wu Xin, Zhao Bin, Xu Honghua

Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100083, China

摘要: 针对并网后变速恒频双馈风电机组的优化运行及其与电网的协调问题, 依据分段分层控制思想, 提出了变速恒频风电机组的并网控制策略: 按照风速将风电机组的控制分为两个阶段, 即低风速的最大风能追踪控制阶段和高风速的恒功率控制阶段, 同时依据分层思想将风电机组电气部分的控制分为参考值的整定和对参考值的跟踪两层控制。利用该分段分层控制策略, 对北方某风电场及其接入系统中风电机组的运行特性和接入系统中关键性节点的电压特性进行了仿真分析, 结果表明该控制策略不但可以实现风电机组的优化运行, 而且能较充分地发挥风电机组中双馈发电机的无功调节能力, 提高风电机组并网后的电压稳定性, 保证全网无功优化运行。

关键词: 变速恒频风电机组; 分段分层控制策略; 风电场; 优化运行

0 引言

可再生能源特别是风能的开发利用已得到世界各国的高度重视, 尤其是 20 世纪末发展起来的变速恒频风力发电技术, 它用双馈电机代替传统的异步电机或同步电机, 不但使风电机组的单机容量不断扩大, 也提高了电力系统调节的灵活性, 改善了风电机组并网特性, 从而延长了风电机组的运行时间, 提高了风电机组的运行效率。

随着变速恒频风电机组单机容量的增加, 其并网容量也不断增加。因此, 为保证并网后电网和风电机组的运行效率、安全性和稳定性, 风电机组与电网间的控制协调问题显得尤为重要。目前, 变速恒频风电机组并网控制的研究主要是控制策略的分析和设计, 包括电压调节策略和频率调节策略。前者是目前的研究重点, 其控制策略的设计依据风电并网容量的大小而不同。当风电并网容量很小、风电容量的任何波动都不足以引起电网较大的调整时, 控制策略一般以最大效率地吸收风能为目标, 按照风速大小将机组最佳运行状态分为启动阶段^[1]、最大风能追踪阶段、恒功率运行阶段及切除阶段并分别予以设计和实现。风电机组由于风速波动而给电网带来的电压、频率影响都由系统承担^[2-5]。随着风电并网容量的不断增加及电力电子技术的快速发展, 双馈发电机灵活的无功调节潜力开始得以充分发挥, 风电机组也开始具备一定的无功调节能力, 随之而确定的控制策略是在充分利用风能的基础上使风电机组参与电网的电压调节, 在有限范围内分担电网的无功潮流, 从而提高风电并网质量和系统的电压稳定性。如文献[6]详细分析了不同风速下风电机组的无功调节裕度, 并在此基础上充分利用双馈发电机的无功调节能力设计了风电场并网点电压调节策略。但目前关于风电机组并网后的频率调节问题研究较少, 随着风电容量的不断增加, 如何有效调节风电机组的有功和无功功率, 使风电机组能合理参与电网电压、频率调整将是很有意义的研究方向^[7-9]。

国内关于风电机组控制部分的研究成果主要是针对单台风电机组而言, 并没有考虑风电机组并网后与电网的控制、协调问题。本文从这一角度出发, 根据双馈发电机灵活的无功调节特性, 以实现风电机组优化运行及提高电压稳定性为目标, 确定风电机组并网的分段分层控制策略。该策略中按风速将风电机组的控制分为 2 个阶段, 即低风速的最大风能追踪阶段和高风速的恒功率运行阶段; 在与电网的控制、协调中采用分层思想, 首先依据电网结构、

风电机组优化运行功率特性、风电机组无功控制方案(本文采取风电机组定子侧恒功率因数控制)完成对风电机组电气部分控制参考值的整定,并在此基础上以双馈发电机定子磁场定向矢量控制为前提,实现对控制参考值的跟踪。为验证该控制策略的有效性,本文以北方某风电场及其接入系统为例,对风扰动和系统侧无功负荷突变情况下风电机组并网后的运行特性及电网中关键节点的电压特性作了相应仿真。结果表明该控制策略不但可实现单台风电机组的优化运行,还能发挥双馈发电机的无功调节能力,使风电机组能参与电网的无功调节,缓解电网的无功压力,提高风电机组和接入系统的电压稳定性,从而实现全网的无功优化运行。

1 变速恒频双馈风电机组分段控制

为充分利用风能,以保证风电机组安全稳定运行的同时最大效率地利用风能这一目标设计变速恒频双馈风电机组的有功功率控制策略。相应的控制策略就是低风速时捕获最大风能和高风速时保持额定功率。本文将这种按风速来划分风电机组运行阶段、确定有功功率控制方式的控制策略称为“分段控制”。当处于低风速阶段时,有多种追踪最大风能的控制方案^[3-5],本文通过风速及最优风功率特性曲线来确定实时风速下风电机组的最大有功输出,并在此基础上由风电机组的有功功率特性估算出风电机组定子侧有功功率的参考值,继而实现分段控制。详细控制方法将在本文第3节中阐述。一典型的变速恒频双馈风电机组最优风功率特性曲线如图1所示。

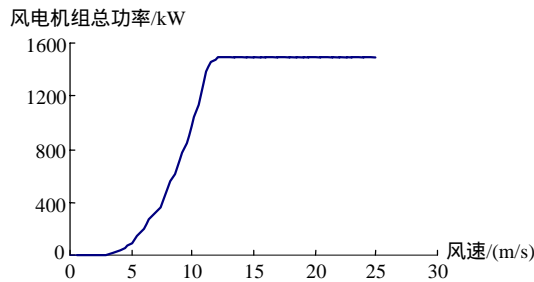


图1 变速恒频双馈风电机组优化运行的风功率特性曲线
Fig.1 Optimized wind speed-power curve of VSWT

当处于高风速阶段即恒功率控制阶段时,风电机组有功输出将保持额定功率不变,风电机组的转速、转子励磁控制量、定子侧有功功率参考值也将保持额定运行情况下的参考值不变,此时,为保证机组的安全稳定运行,风电机组的桨距角控制将开始动作,并随着风速变化不断调整,直至风速达到切除风速。其桨距角控制原理如下:风电机组中风力机捕获的风能与风速的立方成比例关系,同时还与风力机叶片的转速及结构参数有关。根据风力机功率特性方程有

$$P_T = C_p A \frac{\rho v^3 \times 10^3}{2P_N} \quad (1)$$

式中 P_T 为风力机机械功率标么值; C_p 为风能转换效率系数,它是桨距角 β 和叶尖速率比 λ 的函数, $\lambda = R\omega/v$, 其中 R 为叶片半径, m, ω 为风力机叶片转速, rad/s, v 为风速, m/s; A 为叶片扫掠面积, m^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; P_N 为功率基值, kW。

当风速一定时,风力机机械功率的大小取决于 C_p 的大小。 C_p 与桨距角 β 、叶尖速率比 λ 的非线性关系为(其中 λ_t 为过程变量)

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_t} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_t}}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

当风速达到或超过额定风速时，风力机的机械功率 P_T 保持最大值不变，叶片转速 ω 也保持最大转速不变，由式(1)、(2)可知，为保证风电机组恒功率运行，必须随风况的变化调整桨距角 β 。一典型的风速—桨距角调整曲线如图 2 所示，详细的桨距角控制结构设计参见文献[10]。

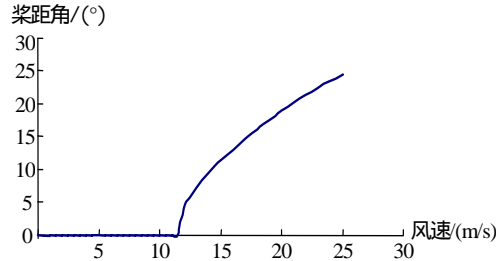


图 2 风速—桨距角调整曲线
Fig.2 Wind speed-pitch control curve

2 变速恒频双馈风电机组分层控制

风能是一种具有随机性、爆发性和不稳定性的能源，如何充分利用风能、提高风电机组与系统间运行的稳定性是风力发电中需解决的重要问题。电力电子技术等的快速发展及脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 控制的交直交变频器和双馈发电机在风电系统中的引入使风电机组的变速恒频高效运行成为现实。它不但能提高机组运行效率、优化风力机运行条件，而且双馈电机转子部分励磁控制的灵活性也使风电机组在一定范围内可作为无功电源参与机组与系统间的电压调节，从而提高风电机组并网后的电压稳定性。因此，针对并网运行的风电机组，为发挥双馈发电机的无功调节能力，在分段控制的基础上将风电机组的电气控制部分按控制信号执行的先后分为 2 个层面，第一层控制参考值的整定，第二层控制参考值的追踪，也就是本文定义的“分层控制”。

(1) 控制参考值的整定

在分层控制策略中，第一层控制尤为重要，它是实现风电机组优化运行及提高风电并网后电压稳定性的基础，其控制原理如下：

1) 风电机组有功功率特性

变速恒频双馈风电机组注入系统的总有功功率 P_e 应包含 2 部分，双馈发电机定子侧注入系统的有功功率 P_s 和发电机转子侧注入系统的有功功率 P_r 。在定子磁场旋转坐标系 $[d_c, q_c, 0]$ 下，令 d_c 轴与定子合成磁场的方向保持一致，并忽略定子电阻，则由双馈发电机稳态电压方程和磁链方程可得出风电机组注入系统的有功功率 P_e 与发电机定子侧注入系统的有功功率 P_s 、无功功率 Q_s 的关系为^[11]

$$P_e = P_s + P_r = \frac{r_r x_{ss} (P_s^2 + Q_s^2)}{X_m^2 |U_s|^2} + \frac{2r_r x_{ss}}{X_m^2} Q_s + (1-s)P_s + \frac{r_r |U_s|^2}{X_m^2} \quad (3)$$

式中 r_r 为发电机转子绕组电阻，pu； x_{ss} 为发电机同步电抗，pu，且 $x_{ss} = x_s + X_m$ ，其中 x_s 为定子漏抗， X_m 为激磁电抗； s 为转差率； U_s 为风电机组并网端母线电压相量。

2) 风电机组无功功率特性

通常情况下，风电机组的无功控制采用发电机定子侧恒功率因数控制模式，因此可假设发电机定子侧功率因数为 $\cos\theta$ ，则有

$$\tan \theta = Q_s / P_s \quad (4)$$

发电机转子侧注入系统的无功功率 Q_r 为

$$Q_r = -s(X_{rr} - \frac{X_m^2}{x_{ss}}) (\frac{x_{ss}^2 P_s}{X_m^2 |\mathcal{U}_s|^2} + \frac{|\mathcal{U}_s|^2}{X_m^2} + \frac{2x_{ss}}{X_m^2} Q_s + \frac{x_{ss}^2 Q_s^2}{X_m^2 |\mathcal{U}_s|^2}) - \frac{s|\mathcal{U}_s|^2}{x_{ss}} - sQ_s \quad (5)$$

风电机组注入系统的总无功功率 Q_e 为

$$Q_e = Q_s + Q_r \quad (6)$$

3) 参考值的整定

为实现风电机组的优化运行、提高风电并网的电压稳定性,一方面要根据风速不断调节风电机组注入系统的有功功率,另一方面还要根据系统运行状态、负荷情况不断调节机组注入系统的无功功率,以适应风速和系统部分的变化,从而保证风电机组并网的电压稳定性。为达到上述目标,本文采用文献[12]中设计的变速恒频双馈风电机组矢量控制结构和策略,并以此为基础设计分层控制策略。由文献[12]中的控制结构可知:变速恒频风电机组存在 4 个状态参考量,分别为风电机组定子侧注入系统的有功功率参考值 P_{sref} 、定子侧注入系统的无功功率参考值 Q_{sref} 、风电机组并网点母线电压参考值 U_{sref} 及为保证风电机组中变频器的正常运行而引入的直流电容电压参考值 V_{dref} 。对于并网运行的变速恒频风电机组来讲,分层控制策略的第一层控制就是对这 4 个控制参考值不断整定的过程。在整定过程中,最基本的是 U_{sref} 的整定。它与文献[12]中控制策略不同的是:控制中它的大小随时间变化,而不是保持为机组的额定电压。它的变化涉及与接入系统的协调,取决于整个电网的运行状态和控制目标,变化量大小由电网调度员下达。本文从优化运行角度考虑 U_{sref} 的整定,以实现全网无功优化运行为目标,令调度员按照全网优化运行方案下达风电机组并网点母线电压数值,并以该电压作为风电机组并网点母线电压参考值 U_{sref} ,运行中将根据下达值的变化整定 U_{sref} 的数值。

P_{sref} 、 Q_{sref} 的整定将依据风速、最优风功率特性曲线、风电机组定子侧功率因数设定值 $\cos \theta$ 和风电机组并网点母线电压参考值、转速测量值(或转速初值)由式(3)、(4)计算得到。与文献[12]控制策略不同的是 $\cos \theta$ 在分层控制中并不是固定不变的,而是依据风电机组并网点母线电压实时值与参考值间的差距在初始给定值附近进行适时调整,以保证风电机组并网点母线电压水平、提高电压稳定性,对于 $\cos \theta$ 的具体调整方案将另文阐述。而直流电容电压参考值 V_{dref} 通常由风电机组电子器件自身特性决定,一般为常数,整定中保持不变。

以上关于参考值的整定控制是随风速、机组运行状态不断调整、逐步优化的过程。需要说明的是:风电机组定子侧功率因数设定值的大小不能随意无限制变动,它必须保证在该功率因数下风电机组输出的有功功率和无功功率在风电机组 $P-Q$ 允许的容量范围内^[13]。正常运行情况下风电机组功率因数较高,约为 0.98。

(2) 控制参考值的追踪

分层控制中的第二层控制又称为参考值的追踪,实际上是对风电机组中连接于发电机转子绕组和系统间的变频器进行控制。

变速恒频风电机组中的变频器一般采用功率可双向流动的变频装置,其模型多采用 PWM 控制的理想交-直-交变频形式,即忽略开关器件的换相重叠和损耗。其调控原理是利用发电机转差频率信号自动控制变频器调制波的频率,同时控制调制波的幅值和相位,使变频器输出电压(即转子励磁电压)的频率达到转差频率,并通过其幅值和相位控制来实现机组的优化运行。由于变频器开关变换时间远小于转差频率的变化时间,因此变频器控制只考虑直流电容充放电的动态过程,而不计调制波频率变换的动态过程。变频器结构简图如图 3 所示,其中变流器 1 通过变压器并联接入系统,变流器 2 直接与双馈发电机转子绕组相连。

此变频器分别由表征变流器 1、变流器 2 调制比和相位差的控制参数 m_1 、 ϕ_1 、 m_2 、 ϕ_2 在定子磁场定向矢量控制的基础上，通过解耦控制来实现对双馈发电机转子励磁电压相量的控制和直流电容电压及并网母线电压的调整。图 3 中， U_s 为发电机并网母线电压； P_1 、 I_1 为注入变流器 1 的有功功率和电流； P_r' 、 I_r' 为注入转子绕组的有功功率和电流； X_T 为并联变压器等值阻抗； U_1 为变流器 1 的输入电压； U_r 为变流器 2 的输出电压； V_d 为直流电压有名值； n 为变压器变比。关于变频器数学模型及控制原理的分析详见文献[12]。

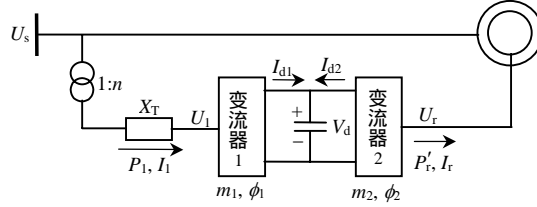


图 3 双馈感应发电机转子部分变频器结构简图

Fig.3 Structure diagram of converters connected with doubly-fed induction generator rotor

本文分层控制中第二层控制的控制结构和策略与文献[12]中变频器部分的控制结构和控制策略基本一致，不同的是文献[12]中变频器控制结构中的4个参考值在本文中由第一层控制提供。

3 分段分层控制策略的设计

根据本文第 2、3 节对风电机组分段分层控制原理的分析，以最大效率地利用风能及发挥风电机组的无功调节能力、实现全网无功优化运行为目标设计的总控制结构如图 4 所示。图 4 不但详细描述了两相旋转坐标系下的分段分层控制策略，也表示出了三相测量量与两相控制量间的转换关系，其中， VR_i ($i=1,2,L,6$) 表示矢量旋转变换； $2/3$ 表示三相—二相变换； K/P 表示直角坐标系与极坐标系间的转换； I 表示产生补偿电动势的环节，详细结构参见文献[11]； PI 表示比例积分控制环节；下标 dcr 、 qcr 表示定子旋转坐标系 $[d_c, q_c, 0]$ 下转子侧的状态量；下标 dcs 、 qcs 表示定子旋转坐标系下定子侧的状态量； U_1 、 θ_1 、 U_2 、 θ_2 分别为变频器中变流器 1 和变流器 2 的交流侧电压幅值和相角； ω_s 、 ω_r 分别为同步转速和发电机转子转速； τ 为控制器伺服机构时间常数； U_B 为直流电容电压基准值，一般为电容的额定电压； k_w 为控制参数； θ_s 为 U_s 的相位； R_r 为发电机转子侧绕组电阻； U_{dc1} 、 U_{qc1} 分别为变流器交流端电压 U_1 的 d_c 、 q_c 轴分量； P_{eref} 为风电机组最优有功功率参考值； γ 为转子 α 相轴与定子 α 相轴间的夹角； γ_r 为 d_c 轴与转子 α 相轴间的夹角； γ_c 为 d_c 轴与定子 α 相轴间的夹角； $I_{\beta s}$ 、 $I_{\alpha s}$ 分别为定子电流经三相—二相变换后的两相电流分量； β_c 为桨距角控制环节的中间变量。

4 变速恒频风电机组并网运行特性仿真

以北方某风电场及其接入系统为例，不考虑风电场各台风电机组地理位置对风速的影响，认为各台风电机组吸收的风能只与机型有关。设定该风电场由同一机型的 10 台单机容量为 1.5MW 的变速恒频双馈风力发电机组组成，与接入系统连接的简化等值线路图如图 5 所示，各节点和线路参数及动态仿真模型见文献[10]。其中单台发电机参数为：发电机转子侧电阻 $R_r=0.0073pu$ ，定子侧电阻 $r_s=0.0076pu$ ，定子漏抗 $x_1=0.1248pu$ ，转子漏抗 $x_2=0.0884pu$ ，激磁电抗 $X_m=1.8365pu$ ，转子惯性时间常数 $T_J=7.10s$ ，转子阻尼系数 $D=0.071pu$ ；变频器部分的变压器变比阻抗 $X_T=0.105pu$ ，直流电容额定电压 $V_d=690V$ ，电容值 $C=0.1mF$ ；风力机部分的叶片扫风面积 $A=3959m^2$ ，额定功率 $P_N=1500kW$ ，机械转动部分时间常数 $T_d=2.5s$ ，空气

密度 $\rho=1.0\text{ kg/m}^3$ 。

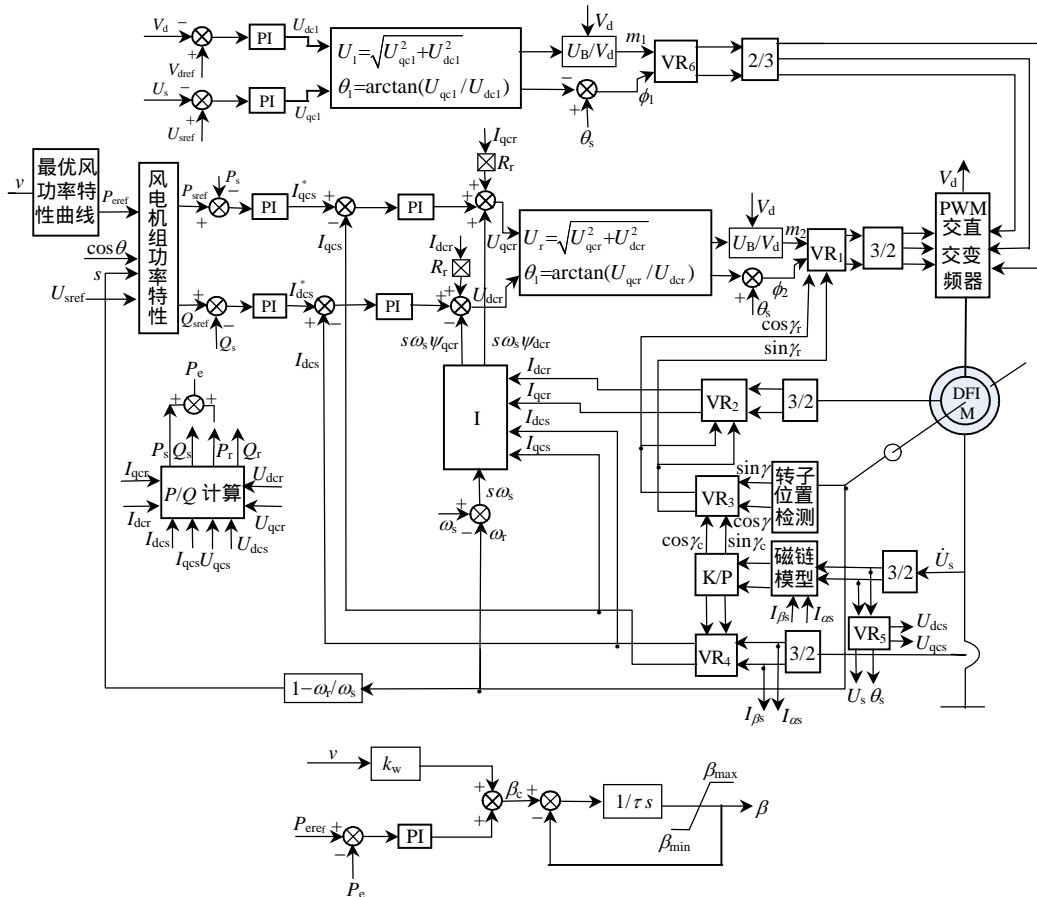


图 4 控制参考值的整定

Fig.4 Setting of electrical control references of VSMT

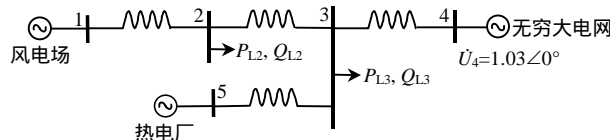


图 5 某风电场与地区电网简化系统接线图

Fig.5 Simplified circuit diagram of a wind farm and its regional network

对于并网运行的风电机组来讲,可能的扰动来自两方面:一种是风扰动,另一种是系统侧扰动。为考察本文提出的分段分层控制策略的控制效果,笔者以风扰动和系统侧某节点处的无功负荷突变为例对风电机组的运行特性和整个系统中关键节点的电压特性进行了仿真分析。

(1) 算例 1

假设风电机组已按调度员下达的优化运行方案运行,其中风电机组定子侧功率因数初始给定值 $\cos\theta=0.98$, $U_{sref}=1.03\text{ pu}$ 。在第 20s 风速发生扰动,扰动形式为逐步增大的渐变风,如图 6(a)所示,则风电机组注入系统的有功功率必将随风速的升高而增大,这时为使并网点母线电压保持在优化运行状况下的电压水平,必须提高风电机组的功率因数。因此,在仿真中风电机组定子侧功率因数给定值将随着风速的变化在初始值 0.98 附近略有提高。整个系统在以上条件下的动态仿真特性如图 6(b)~(h)所示。由图 6 可见:

1) 风电机组有功输出能很好地跟踪有功输出参考值。这是由于风电机组有功输出参考值的设定由风电机组最佳风功率特性曲线决定。图 6(b)说明在分段分层控制中风电机组能实

现最大风能的追踪控制，实现了最大效率利用风能的目标。

2) 由图 6(c)可知，风电机组定子侧无功功率也能很好地跟踪其参考值的变化。由风速扰动引起的风电机组注入系统有功功率的变化必将引起风电机组并网点母线电压的波动，为平息扰动带来的电压波动，尽量维持扰动前的优化电压水平，必须调整定子侧功率因数的设定值。而图 6(c)中无功功率参考值的变化正反映了功率因数的调整过程，良好的追踪过程也说明了分段分层控制策略较好的控制效果。

3) 由图 6(e)可知，风电机组并网点母线电压在参考值附近上下波动，其最大偏差幅度不超过额定电压的百分之一，因此该分段分层控制策略能平息扰动带来的电压波动，提高风电机组并网点电压的稳定性。

4) 由图 6(f)~(h)可知，系统侧 3 个关键节点的电压经过波动后都能与扰动前的状态值基本保持一致，因此该控制策略的控制效果比较理想。

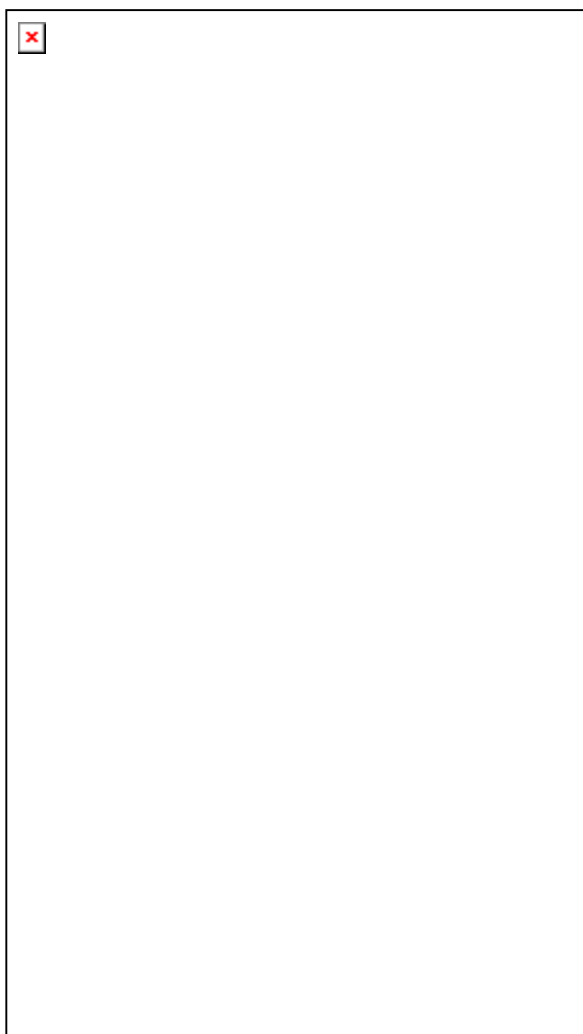


图 6 渐变风扰动下的风电机组与接入系统的动态特性

Fig. 6 Dynamic characteristics of VSWT and the connected network under the disturbances of ramp wind

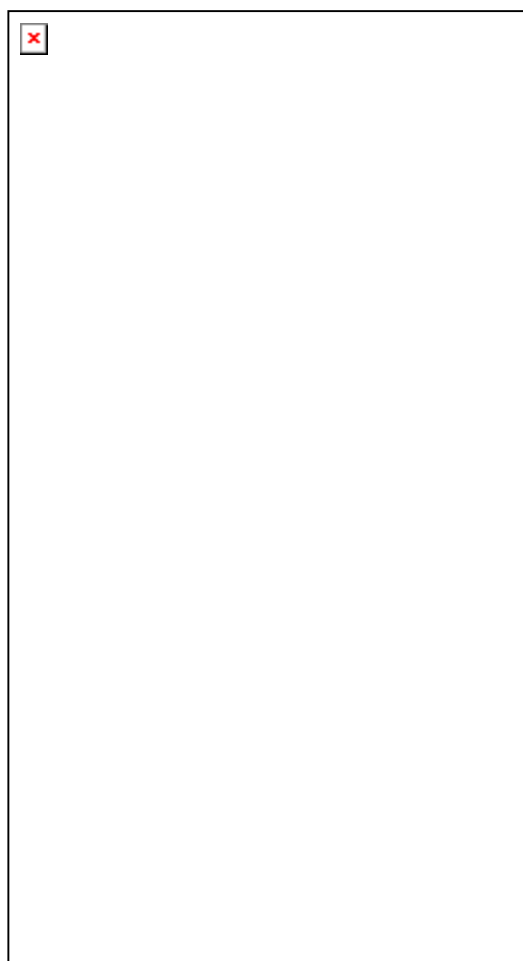


图 7 无功负荷突变下风电机组与接入系统的动态特性

Fig.7 Dynamic characteristics of VSWT and the connected network under the disturbances of reactive power variation

(2) 算例 2

假设风电机组已按调度员下达的优化运行方案运行，其中风电机组定子侧功率因数初始

给定值 $\cos\theta=0.98$, $U_{\text{ref}}=1.03\text{pu}$ 。风速是以 10m/s 为平均风速的随机风况,当接入系统的节点 2 处无功负荷在第 40s 发生突变、突变值为 0.03pu 时,为保证风电机组并网点母线电压水平,必须降低风电机组的功率因数,因此仿真中风电机组定子侧功率因数将随之作相应调整,整个系统在以上条件下的动态仿真特性如图 7 所示。

由图 7 可见,系统无功负荷的变化对风电机组的总有功出力没有影响,因为风电机组的总有功决定于风速的变化和风力机的结构;但系统无功负荷的变化及随负荷变化而人为调整的风电机组功率因数设定值的改变会使风电机组注入系统的无功功率发生变化,随之整个系统各节点的电压和潮流都将作进一步调整。由图 7 还可以看出,无功负荷的突变使系统的节点电压略有下降,但由于风电机组定子侧功率因数给定值的适时调整,系统各节点电压下降的幅度很小,尤其是风电机组并网点电压基本没有变化。节点 2 是负荷突变点,电压变化幅度最大,但也没有超过额定值的 1%。此外,由图 7 中虚线和实线的拟合状况可见风电机组状态量能较好地跟踪参考值变化,说明在该扰动下分段分层控制策略控制效果比较理想,可以较好地实现控制目标。

5 结论

本文提出的分段分层控制策略不但能实现风电机组的优化运行,而且能充分发挥双馈发电机的无功调节能力,使其能在允许范围内参与系统的无功调节,缓解电网的无功压力,改善风电并网的电压稳定性。需要说明的是:本文提出的控制策略适用于风电机组及其接入系统的状态均处于稳定运行范围内的情况,当系统电压处于紧急状态时应首先采取其它控制手段恢复电压,然后才能实施该分段分层控制策略。

参考文献

1. 刘其辉,贺益康,卞松江.变速恒频风力发电机空载并网控制[J].中国电机工程学报,2004,24(3):6-11
2. 林成武,王凤祥,姚兴佳.变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术研究[J].中国电机工程学报,2003,23(11):122-125.
3. 刘其辉,贺益康,赵仁德.变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J].电力系统自动化,2003,27(20):62-67.
4. Datta R,Ranganathan V T .A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system[J].IEEE Trans on Energy Conversion,2003,18(1):163-168.
5. 淡军,孙茂相,杨继华.风电系统最大功率捕获的研究[J].沈阳工业大学学报,2003,25(1):40-42.
6. Tapi a A ,Tapi a G ,Ostolaza J X . Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J].Renewable Energy,2004,29(3):377-392.
7. Rodri guez-Amenedo J L ,Arnalte S ,Burgos J C . Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbine[J].IEEE Trans on Energy Conversion,2002,17(2):279-284.
8. Terje Gjengedal . System control of large scale wind power by use of automatic generation control (AGC)[C].CIGRE/IEEE PES International Symposium,2003:15-21.
9. Jakana E ,Lee H ,Nick J . Control of DFIG wind turbines[J].IEE Power Engineer,2003,17(1):28-32.
10. 李晶,宋家骅,王伟胜.大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J].中国电机工程学报,2004,24(6):100-105.
11. 李晶.变速恒频双馈风电机组动态模型及并网控制策略的研究[D].北京:华北电力大学.
12. 李晶,宋家骅,王伟胜.考虑变频器特性的变速恒频双馈风力发电机组控制策略的研究与仿真[J].电网技术,2004,28(21):11-16.
13. Tapi a A ,Tapi a G ,Ostolaza J X . Modeling and control of a wind turbine driven

doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2003, 18(2) : 194-204.

联系方式：

联系人：李晶

联系电话：010-62558252

传真：62521026

E-mail：lijing@mail.iee.ac.cn

通信地址：北京市海淀区中关村北二条 6 号中科院电工所可再生能源组

邮政编码：100083