

基于反推算法的双馈感应风力发电机直接功率控制

孙 丹, 熊平化, 方 扬, 邓伦杰

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要:为提高双馈感应风力发电机的控制性能,提出了一种基于反推算法的直接功率控制(BS-DPC)策略。讨论了在平衡电网条件下BS-DPC的基本原理,以及不平衡电网条件对BS-DPC的影响,并提出了针对不平衡电网条件的BS-DPC新的控制目标和改进控制策略。在平衡电网条件下,对双馈感应风力发电机基于传统查询开关表的直接功率控制(LUT-DPC)、矢量控制(VC)和BS-DPC进行了仿真和实验研究,结果证明,BS-DPC在继承了LUT-DPC优异动态性能的同时,可获得恒定开关频率,并减小电流谐波和功率波动,具有良好的稳态性能;不平衡电网条件的仿真和实验研究同样证明了改进BS-DPC策略的正确性和有效性。

关键词:双馈感应发电机;反推控制;直接功率控制;不平衡电网;固定开关频率

0 引言

当前,双馈感应风力发电机控制主要分为矢量控制(VC)和直接功率控制(DPC)。其中,VC由于对电流控制精度高、跟踪性能好已得到较多应用^[1];然而,VC中的比例-积分(PID)控制器带来了动态响应较慢、需较复杂参数调节和同步旋转坐标变换的问题,实际动态性能欠佳。由直接转矩控制(DTC)发展来的DPC可较好解决以上问题。传统基于开关表的直接功率控制(LUT-DPC)结构简单,无需复杂坐标变换,动态响应快,但滞环控制器使得稳态下有功、无功功率波动较大,且变换器开关频率不固定导致电流谐波次数不固定,滤波器设计较困难。

针对以上问题,文献[2]提出了一种基于PI控制器和空间矢量调制(SVM)的DPC,可获得较小的功率波动和恒定开关频率,但PI控制器的引入使其存在与VC相同的问题。文献[3]结合了DPC和SVM,根据无差拍原则计算所需电压矢量,并利用SVM产生脉宽调制(PWM)脉冲,控制结构简单;文献[4]提出一种开关频率恒定的预测DPC;文献[5]提出一种滑模变结构DPC,利用滑模变结构算法得到电压矢量,并通过SVM产生PWM波;上述方法均可获得较好的稳态和动态性能,且开关频率恒定。但文献[3]方法对数学模型中的参数依赖度较高,因而鲁棒性不强;文献[4]需实时计算3个矢量的作用时间,运算量较大,矢量选择较复杂;文献[5]中滑模

控制器固有的抖动问题会影响系统性能。文献[6]提出一种高阶滑模控制方法消除控制中的抖动,但未研究不平衡电网条件下该策略的有效性。

反推控制策略因其优秀的动静态性能,已在电机驱动^[7-9]和电力系统^[10]等领域获得了广泛研究,其在航空航天领域中对改善过渡过程的品质也表现出巨大潜力^[11],因此,在电网条件复杂的风电系统中也具有极大应用前景。本文针对双馈感应风力发电机提出了一种基于反推算法的直接功率控制(BS-DPC)策略,以期获得优异的动静态性能。本文首先介绍了双馈感应风力发电机数学模型;其次,对反推算法进行了简单介绍,并将其与DPC相结合,对BS-DPC进行了详尽理论推导,利用SVM技术解决了开关频率不固定问题;此外,在不平衡电网条件下,针对BS-DPC提出了3种控制目标及改进控制方案;实验研究结果证明了该方法的正确性和有效性。

1 双馈感应风力发电机数学模型

图1为双馈感应风力发电机系统结构图。

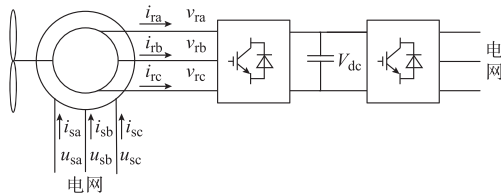


图1 双馈感应风力发电机系统结构
Fig.1 System structure of doubly-fed induction wind turbines

收稿日期: 2014-08-16; 修回日期: 2014-11-04。

国家自然科学基金资助项目(51377141);浙江省自然科学基金资助项目(LY13E070001)。

图中: u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为机侧定子电网电压; v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} 为机侧转子电压; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为机侧定子电网电流; i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} 为机侧转子电流; V_{dc} 为直流母线电压。双馈感应风力发电机定、转子绕组均采用电动机惯例,即绕组压降正方向与绕组电流正方向一致。

根据恒幅值变换原则,转子侧变换器在定子两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中的数学模型的向量形式电压方程和磁链方程可分别表示为^[9]:

$$\begin{cases} U_{sa\beta} = R_s I_{sa\beta} + \frac{d\psi_{sa\beta}}{dt} \\ V_{ra\beta} = R_r I_{ra\beta} + \frac{d\psi_{ra\beta}}{dt} - j\omega_r \psi_{ra\beta} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sa\beta} = L_s I_{sa\beta} + L_m I_{ra\beta} \\ \psi_{ra\beta} = L_r I_{ra\beta} + L_m I_{sa\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 α 和 β 表示在定子两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量; R_s 和 R_r 分别为定子绕组电阻和转子绕组电阻; L_s, L_r, L_m 分别为定子绕组电感、转子绕组电感和定转子绕组间互感; ω_r 为转子电角速度。

由式(2)可得:

$$\begin{cases} \psi_{ra\beta} = \sigma L_m I_{sa\beta} + \frac{L_r}{L_m} \psi_{sa\beta} \\ \psi_{sa\beta} = \sigma L_m I_{ra\beta} + \frac{L_s}{L_m} \psi_{ra\beta} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma = 1 - L_s L_r / L_m^2$ 。

则可得到转子侧变换器在定子两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的等效电路如图 2 所示。

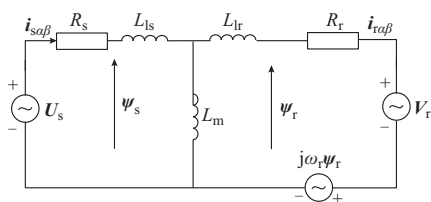


图 2 定子两相静止坐标系下转子侧变换器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of rotor-side convert under stator stationary coordinates

由式(1)和式(3)可推导出:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sa\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_m} \left[(V_{ra\beta} - R_r I_{ra\beta}) - \frac{L_r}{L_m} (U_{sa\beta} - R_s I_{sa\beta}) + j\omega_r \left(\sigma L_m I_{sa\beta} + \frac{L_r}{L_m} \psi_{sa\beta} \right) \right] \\ \frac{dI_{ra\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_m} \left[(U_{sa\beta} - R_s I_{sa\beta}) - \frac{L_s}{L_m} (V_{ra\beta} - R_r I_{ra\beta}) - j \frac{\omega_r L_s}{L_m} \left(\sigma L_m I_{sa\beta} + \frac{L_r}{L_m} \psi_{sa\beta} \right) \right] \end{cases} \quad (4)$$

定子两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下,双馈感应风力发电机定子从电网吸收的瞬时有功和无功功率可表示为:

$$S = [P_s \quad Q_s] = \frac{3}{2} I_{sa\beta}^* U_{sa\beta} \quad (5)$$

式中: $*$ 表示共轭。

对式(5)求导,可得:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{3}{2} \left(U_{sa\beta}^* \frac{dI_{sa\beta}}{dt} + I_{sa\beta}^* \frac{dU_{sa\beta}}{dt} \right) \quad (6)$$

考虑到正常电网电压下,定子电压 $U_{sa\beta}$ 在静止坐标系下有:

$$\frac{dU_{sa\beta}}{dt} = j\omega_1 \|U_{sa\beta}\| e^{j\omega_1 t} = j\omega_1 U_{sa\beta} \quad (7)$$

式中: $\|U_{sa\beta}\|$ 为电网电压幅值; ω_1 为电网同步角速度。

将式(4)和式(7)代入式(6)中,推导得:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} = & \frac{3}{2\sigma L_m} \left(U_{sa\beta} V_{ra\beta}^* - \frac{L_r}{L_m} \|U_{sa\beta}\|^2 - j \frac{L_r \omega_r}{L_m} U_{sa\beta} \psi_{sa\beta}^* + \frac{2L_r R_s}{3L_m} S - R_r U_{sa\beta} I_{ra\beta}^* \right) + \\ & j\omega_{slip} S \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\omega_{slip} = \omega_1 - \omega_r$, 为转差角速度。

忽略定子电阻的影响,则定子磁链可表示为:

$$\psi_{sa\beta} = \frac{U_{sa\beta}}{j\omega_1} = -j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中,并对视在功率解耦,可得有功、无功功率变化率表达式为:

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2\sigma L_m} \frac{L_r}{L_m} \frac{\omega_{slip}}{\omega_1} \|U_{sa\beta}\|^2 - \omega_{slip} Q_s + \frac{L_r}{\sigma L_m} \frac{R_s}{L_m} P_s + \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{sa} v_{ra} + u_{s\beta} v_{r\beta}) - \frac{3R_r}{2\sigma L_m} (u_{sa} i_{ra} + u_{s\beta} i_{r\beta}) \\ \frac{dQ_s}{dt} = \omega_{slip} P_s + \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{s\beta} v_{ra} - u_{sa} v_{r\beta}) + \frac{L_r}{\sigma L_m} \frac{R_s}{L_m} Q_s - \frac{3R_r}{2\sigma L_m} (u_{s\beta} i_{ra} - u_{sa} i_{r\beta}) \end{cases} \quad (10)$$

2 双馈感应风力发电机 BS-DPC

反推算法于 1991 年由 Kokotovic 等首先提出^[11-12],其以 Lyapunov 稳定性理论为基础,以满足 Lyapunov 函数收敛为目标,使系统全局渐进稳定。反推算法的基本思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的几个低阶子系统,从最低阶开始设计部分 Lyapunov 函数,引入中间虚拟控制量来设计控制律,然后一步步反推设计到整个控制系统,完成整个反推算法的设计。由于利用反推算法设计得到的控制系统本身即基于 Lyapunov 稳定性得

到,因而可严格保证系统稳定。

本文将反推算法与 DPC 技术结合,提出了一种针对双馈感应风力发电机的 BS-DPC 策略。控制目标主要是定子有功、无功功率跟随其参考值(以上标 ref 表示),即误差为零,因此定义定子有功、无功功率误差为:

$$\begin{cases} e_p = P_s^{\text{ref}} - P_s \\ e_q = Q_s^{\text{ref}} - Q_s \end{cases} \quad (11)$$

当 e_p 和 e_q 趋于零,即可实现控制目标。选取 e_p 和 e_q 作为状态变量,可构造 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2}e_p^2 + \frac{1}{2}e_q^2 \quad (12)$$

通常情况下,为使双馈感应风力发电机稳定运行,其有功、无功功率的参考值恒定,并且其导数为零。对式(12)求导,得

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e_p \frac{de_p}{dt} + e_q \frac{de_q}{dt} \\ &= -e_p \left[-\frac{3}{2\sigma L_m L_m} \frac{L_r \omega_{\text{slip}}}{\omega_1} \|U_{s\alpha\beta}\|^2 - \omega_{\text{slip}} Q_s + \right. \\ &\quad \left. \frac{L_r R_s}{\sigma L_m L_m} P_s + \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{sa} v_{ra} + u_{s\beta} v_{r\beta}) - \right. \\ &\quad \left. \frac{3R_r}{2\sigma L_m} (u_{sa} i_{ra} + u_{s\beta} i_{r\beta}) \right] - e_q \left[\omega_{\text{slip}} P_s + \right. \\ &\quad \left. \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{s\beta} v_{ra} - u_{sa} v_{r\beta}) + \frac{L_r R_s}{\sigma L_m L_m} Q_s - \right. \\ &\quad \left. \frac{3R_r}{2\sigma L_m} (u_{s\beta} i_{ra} - u_{sa} i_{r\beta}) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

由 Lyapunov 稳定性可知,当 V 大于等于零且其导数小于零时,系统趋于稳定。构建如下关系式:

$$\frac{dV}{dt} = -k_p e_p^2 - k_q e_q^2 \leq 0 \quad (14)$$

式中: k_p 和 k_q 分别为有功、无功功率调节参数。

如果 $k_p > 0, k_q > 0$,可确保 $dV/dt \leq 0$;又因式(12)得 V 一定大于或等于零,因此系统稳定。

对 $dV/dt \leq 0$ 两边积分可得:

$$\int_0^\infty \frac{dV}{dt} dt = V(\infty) - V(0) \leq 0 \quad (15)$$

由式(12)可得, $V(\infty) \geq 0$,因此有:

$$-V(0) \leq V(\infty) - V(0) \leq 0 \quad (16)$$

由此可知, $\int_0^\infty (dV/dt) dt$ 存在且有界。根据

Barbalat 定理^[13],得 $\lim_{t \rightarrow \infty} dV/dt = 0$,从而得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_p = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0$ 。可见,反推算法能够使得跟踪误差渐近趋于零,达到精确跟踪。

将式(14)代入式(13)可推出双馈感应风力发电

机在定子两相坐标系下的输出电压表达式:

$$\begin{cases} v_{ra} = \frac{2\sigma L_m}{3 \|U_{s\alpha\beta}\|^2} \left[k_p u_{sa} (P_s^{\text{ref}} - P_s) - \frac{L_r R_s P_s}{\sigma L_m^2} + \right. \\ \quad k_q u_{s\beta} (Q_s^{\text{ref}} - Q_s) - \frac{L_r R_s Q_s}{\sigma L_m^2} + \omega_{\text{slip}} u_{sa} Q_s - \\ \quad \left. \omega_{\text{slip}} u_{s\beta} P_s \right] + \frac{L_r \omega_{\text{slip}}}{L_m \omega_1} u_{sa} \\ v_{r\beta} = \frac{2\sigma L_m}{3 \|U_{s\alpha\beta}\|^2} \left[k_p u_{s\beta} (P_s^{\text{ref}} - P_s) - \frac{L_r R_s P_s}{\sigma L_m^2} - \right. \\ \quad k_q u_{sa} (Q_s^{\text{ref}} - Q_s) - \frac{L_r R_s Q_s}{\sigma L_m^2} + \omega_{\text{slip}} u_{s\beta} Q_s + \\ \quad \left. \omega_{\text{slip}} u_{sa} P_s \right] + \frac{L_r \omega_{\text{slip}}}{L_m \omega_1} u_{s\beta} \end{cases} \quad (17)$$

本文的反推调节系数 k_p 和 k_q 在理论上可结合最优控制理论和具体系统控制性能要求,以进行参数优化设计,但计算较为复杂。一般情况下,根据经验调节值即可满足工程要求。

图 3 为双馈感应风力发电机系统 BS-DPC 结构框图。首先将采集到的定子电压 u_{sabc} 和电流 i_{sabc} 经坐标变换得到 $U_{s\alpha\beta}$ 和 $I_{s\alpha\beta}$;然后利用式(5)估算瞬时有功功率 P_s 和无功功率 Q_s ,再结合其参考值 P_s^{ref} 和 Q_s^{ref} 一起输入到反推控制器(式(17)),得到双馈感应风力发电机转子侧变换器的输出电压参考值,经转子两相静止坐标系转换后,作为空间矢量脉宽调制(SVPWM)模块的参考量,进而调制得到开关信号 S_a, S_b, S_c 。与文献[3]的 VC 系统中 4 个可调 PI 参数相比,BS-DPC 只需两个可调参数 k_p 和 k_q ;且从图 3 可看出,BS-DPC 控制结构较简洁。

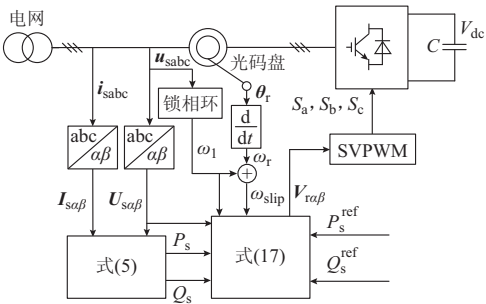


图 3 双馈感应风力发电机 BS-DPC 原理框图
Fig.3 Block diagram of BS-DPC for doubly-fed induction wind turbines

3 不平衡电网下的改进 BS-DPC 策略

3.1 不平衡电网的影响

根据瞬时对称分量理论^[14],可得不平衡电网电压下双馈感应风力发电机的瞬时功率为:

$$\begin{cases} P_s = P_{s0} + P_{si2} + P_{su2} \\ Q_s = Q_{s0} + Q_{si2} + Q_{su2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_{s0} 和 Q_{s0} 分别为有功、无功功率稳定分量; P_{si2} 和 Q_{si2} 分别为由负序电网电流和正序电网电压引起的有功、无功功率 100 Hz 波动分量; P_{su2} 和 Q_{su2} 分别为由负序电网电压和正序电网电流引起的有功、无功功率 100 Hz 波动分量。

当电网电流或定子电流中不含奇次谐波、只含有基波正负序分量时,双馈感应风力发电机定子从电网吸收的瞬时有功和无功功率 P_s 和 Q_s 中均含有直流分量和 100 Hz 波动分量。若要使其跟随恒定的功率给定值,需使有功和无功功率中的 100 Hz 波动分量为零。即

$$\begin{cases} \|U_{sa\beta+}\| \|I_{sa\beta-}\| \cos(2\omega_1 t + \theta_{u+} - \theta_{i-}) + \\ \|U_{sa\beta-}\| \|I_{sa\beta+}\| \cos(2\omega_1 t + \theta_{i+} - \theta_{u-}) = 0 \\ \|U_{sa\beta+}\| \|I_{sa\beta-}\| \sin(2\omega_1 t + \theta_{u+} - \theta_{i-}) - \\ \|U_{sa\beta-}\| \|I_{sa\beta+}\| \sin(2\omega_1 t + \theta_{i+} - \theta_{u-}) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中:下标+和-分别表示正序和负序分量; θ_u 和 θ_i 分别为电网电压和电流初相角。

当满足以下条件时,式(19)成立。

$$\begin{cases} \|U_{sa\beta+}\| \|I_{sa\beta-}\| = \|U_{sa\beta-}\| \|I_{sa\beta+}\| \\ \cos(2\omega_1 t + \theta_{u+} - \theta_{i-}) = -\cos(2\omega_1 t + \theta_{i+} - \theta_{u-}) \\ \sin(2\omega_1 t + \theta_{u+} - \theta_{i-}) = \sin(2\omega_1 t + \theta_{i+} - \theta_{u-}) \end{cases} \quad (20)$$

但很显然,式(20)后两个等式无法同时成立,即无法同时消除有功、无功功率中的 100 Hz 波动分量,无法同时实现恒定有功、无功功率跟随。若需继续保持有功、无功功率恒定,电流中必将产生较高奇次谐波,使得电流波形畸变严重,影响输出电能质量。为此,需分析不平衡电网条件对控制算法的影响,并改进原 BS-DPC 控制目标。对式(5)求导可得:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{3}{2} \left(U_{sa\beta}^* \frac{dI_{sa\beta}}{dt} + I_{sa\beta}^* \frac{dU_{sa\beta}}{dt} \right) \quad (21)$$

考虑到定子电压中负序分量的存在,定子电压 $U_{sa\beta}$ 在静止坐标系下有:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{sa\beta}}{dt} &= \frac{dU_{sa\beta+}}{dt} + \frac{dU_{sa\beta-}}{dt} = \\ & j\omega_1 \|U_{sa\beta+}\| e^{j(\omega_1 t + \theta_{u+})} - \\ & j\omega_1 \|U_{sa\beta-}\| e^{-j(\omega_1 t + \theta_{u-})} = j\omega_1 U_{sa\beta+} - j\omega_1 U_{sa\beta-} \end{aligned} \quad (22)$$

将式(4)和式(22)代入式(21)中,得

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \frac{3}{2\sigma L_m} \left(U_{sa\beta}^* \mathbf{V}_{ra\beta}^* - \frac{L_r}{L_m} \|U_{sa\beta}\|^2 + \right. \\ & \left. \frac{2L_r R_s}{3L_m} \mathbf{S} - R_r U_{sa\beta}^* \mathbf{I}_{ra\beta}^* - j \frac{L_r \omega_r}{L_m} U_{sa\beta}^* \mathbf{\Psi}_{sa\beta}^* \right) + \\ & j\omega_{slip} \mathbf{S} - 3j\omega_1 U_{sa\beta-}^* \mathbf{I}_{sa\beta-}^* \end{aligned} \quad (23)$$

忽略定子电阻的影响,定子磁链与定子电压的关系可近似表示为:

$$U_{sa\beta} = \frac{d\mathbf{\Psi}_{sa\beta}}{dt} \quad (24)$$

考虑到定子电压和磁链正、负序有如下关系:

$$\begin{cases} \mathbf{\Psi}_{sa\beta+} = -j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta+} \\ \mathbf{\Psi}_{sa\beta-} = j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta-} \end{cases} \quad (25)$$

则定子磁链可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Psi}_{sa\beta} &= \mathbf{\Psi}_{sa\beta+} + \mathbf{\Psi}_{sa\beta-} = -j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta+} + j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta-} = \\ & -j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta} + 2j \frac{1}{\omega_1} U_{sa\beta-} \end{aligned} \quad (26)$$

将式(26)代入式(23),对视在功率解耦,可得不平衡电网下有功、无功功率变化率表达式为:

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2\sigma L_m} \frac{L_r}{L_m} \frac{\omega_{slip}}{\omega_1} \|U_{sa\beta}\|^2 - \\ \omega_{slip} Q_s - \frac{3}{\sigma L_m} \frac{L_r}{L_m} \frac{\omega_r}{\omega_1} (u_{sa} u_{sa-} + u_{s\beta} u_{s\beta-}) + \\ 3\omega_1 (i_{sa} u_{s\beta-} - i_{s\beta} u_{sa-}) + \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{sa} v_{ra} + \\ u_{s\beta} v_{r\beta}) + \frac{L_r}{\sigma L_m} \frac{R_s}{L_m} P_s \\ \frac{dQ_s}{dt} = \omega_{slip} P_s - \frac{3}{\sigma L_m} \frac{L_r}{L_m} \frac{\omega_r}{\omega_1} (u_{s\beta} u_{sa-} - u_{sa} u_{s\beta-}) - \\ 3\omega_1 (i_{sa} u_{sa-} + i_{s\beta} u_{s\beta-}) + \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{s\beta} v_{ra} - \\ u_{sa} v_{r\beta}) + \frac{L_r}{\sigma L_m} \frac{R_s}{L_m} Q_s \end{cases} \quad (27)$$

比较式(27)和式(10),不平衡电网条件下的功率变化需考虑负序电压的影响,在控制算法中也需加以修正。即以式(27)取代式(10)代入式(13),并代入新的不同需求控制目标,完成改进 BS-DPC 控制算法的设计。

3.2 改进控制目标

改进目标以降低电流谐波为目标,使电流尽可能只含有基波正负序分量^[5]。现设定新的功率给定参考值为:

$$\begin{cases} P_{ref_new} = P_s^{ref} + P_{si2} + P_{su2} \\ Q_{ref_new} = Q_s^{ref} + Q_{si2} + Q_{su2} \end{cases} \quad (28)$$

与式(18)比较可知,式(28)中以原策略的 P_s^{ref} 和 Q_s^{ref} 代替了功率稳定分量 P_{s0} 和 Q_{s0} 。当新的功率给定参考信号满足式(28)时,由于 DPC 将有功、无功功率作为控制变量,若控制策略有效,则功率将

会跟随其参考值,即可实现电流中只含基波正负序分量。实际中,由于变换器的非线性特性,电流中会存在少量谐波。

基于以上分析,可根据系统的工况提出不同的控制目标,得到不同的给定参考值,进一步实施控制。

1)目标 I :获得正弦对称的电网电流。令新的给定参考值中的 P_{si2} 和 Q_{si2} 为零,即

$$\begin{cases} P_{ref_new} = P_s^{ref} + P_{su2} = P_s^{ref} + \frac{3}{2}(u_{sa} - i_{sa+} + u_{sb} - i_{sb+}) \\ Q_{ref_new} = Q_s^{ref} + Q_{su2} = Q_s^{ref} + \frac{3}{2}(u_{sb} - i_{sa+} - u_{sa} - i_{sb+}) \end{cases} \quad (29)$$

2)目标 II :消除无功功率中 100 Hz 波动分量。令新的给定参考值中的 $Q_{si1} + Q_{si2} = 0$,则可推导出 $P_{si2} = P_{su2}$ 。考虑负序电流成分较小,难以精确提取,故在式(28)中,用 P_{su2} 代替 P_{si2} ,即

$$\begin{cases} P_{ref_new} = P_s^{ref} + 2P_{su2} = \\ P_s^{ref} + 3(u_{sa} - i_{sa+} + u_{sb} - i_{sb+}) \\ Q_{ref_new} = Q_s^{ref} \end{cases} \quad (30)$$

3)目标 III :消除有功功率中 100 Hz 波动分量。令新的给定参考值中的 $P_{si2} + P_{su2} = 0$,可推导出 $Q_{si2} = Q_{su2}$ 。考虑到负序电流成分较小,难以精确提取,故在式(28)中,可用 Q_{su2} 代替 Q_{si2} ,即

$$\begin{cases} P_{ref_new} = P_s^{ref} + P_{si2} + P_{su2} = P_s^{ref} \\ Q_{ref_new} = Q_s^{ref} + Q_{si2} + Q_{su2} = \\ Q_s^{ref} + 3(u_{sb} - i_{sa+} - u_{sa} - i_{sb+}) \end{cases} \quad (31)$$

4 仿真与实验研究

为验证本文提出方法的有效性,利用 MATLAB/Simulink 仿真工具,并基于如图 4 所示的双馈感应风力发电机实验平台,分别进行了平衡电网下传统 LUT-DPC,VC 和 BS-DPC 的对比研究,以及不平衡电网下的改进 BS-DPC 策略的研究。

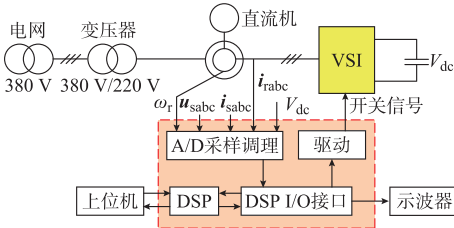


图 4 双馈感应风力发电机实验平台示意图
Fig.4 Schematic diagram of doubly-fed induction wind turbines experiment platform

图 4 中:VSI 表示电压源型逆变器;A/D 表示模拟/数字;I/O 表示输入/输出。实验中控制器选

用 TI 公司的数字信号处理器(DSP) TMS320F2812,开关器件选用 Semikon 的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块 SKM75GB124D,采用一台 3 kW 直流电机对风力机进行模拟并拖动双馈感应风力发电机。具体仿真、实验参数参见附录 A。

4.1 平衡电网条件下系统性能比较研究

平衡电网条件下双馈感应风力发电机在给定有功、无功功率阶跃变化时,分别采用 LUT-DPC,VC 和 BS-DPC 策略的仿真结果见附录 B。给定有功功率阶跃变化时的实验波形见附录 C 图 C1,其中 P_s 初始给定值为 0 kW,阶跃给定值为 -1 kW, Q_s 给定值为 0 kvar。经测试确定有功功率调节参数 k_p 为 6.5、无功功率调节参数 k_q 为 7.8。其无功功率阶跃的实验波形见附录 C 图 C2。可看出,给定有功、无功功率阶跃时,LUT-DPC 和 BS-DPC 响应时间相近,而 VC 的响应时间明显要长,说明 BS-DPC 的动态性能优于 VC,且与 LUT-DPC 相当。稳态时,LUT-DPC 的功率波动较大,且有功功率存在一定静差,而另外两种策略对功率脉动的抑制效果显著,定、转子电流也较为正弦、光滑,谐波较低。

图 5 为上述 3 种控制策略下稳态定子 A 相电流总谐波畸变率(THD)结果,可看出,LUT-DPC 的电流谐波成分含量最高,且开关频率不固定,谐波成分分布在整个频谱范围内,这将会导致电网谐波污染及电力滤波器设计困难;BS-DPC 与 VC 的电流谐波含量较低,由于均采用了 SVM,开关频率固定,电流谐波主要集中于开关频率及其整数倍附近。

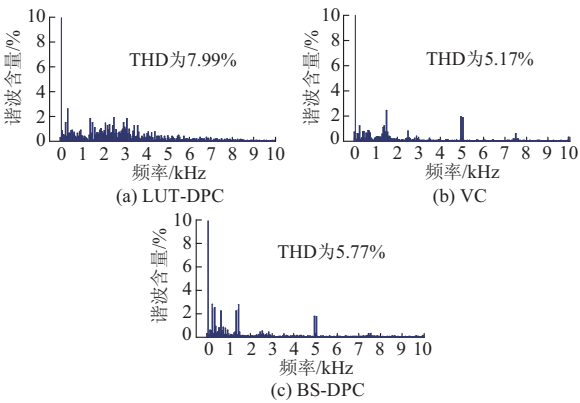


图 5 平衡电网条件下实验电流频谱
Fig.5 Experimental current spectrum under balanced power grid

上述实验结果充分验证了平衡电网条件下 BS-DPC 策略优良的动静态性能。

4.2 不平衡电网条件下改进 BS-DPC 性能研究

电网电压不平衡度为 20%时原目标和改进目标下的 BS-DPC 的仿真结果见附录 D。实验结果见

附录 E 图 E1 和图 6,其中 P_s 给定值为 -1 kW ; Q_s 给定值为 -1 kvar 。有功功率调节参数 k_p 为 6.5、无功功率调节参数 k_q 为 7.8。基于原目标的原 BS-DPC 的实验结果见附录 E 图 E1(a),可看出,其可保持有功、无功功率恒定的目标,但其电流畸变严重。基于目标 I 的改进 BS-DPC 实验结果见附录 E 图 E1(b),其有功、无功功率都有 100 Hz 的波动,但能有效消除负序电流成分,且定子电流正弦、对称。基于目标 II 的改进 BS-DPC 结果见附录 E 图 E1(c),其有功功率具有 100 Hz 的波动,但其无功功率恒定,且此时定子电流虽不对称,但仍保持正弦,说明其有效地消除了无功功率的波动。基于目标 III 的改进 BS-DPC 结果见附录 E 图 E1(d),其无功功率具有 100 Hz 的波动,但其有功功率恒定,且此时的定子电流虽不对称,但仍保持正弦,说明其可有效消除有功功率波动。

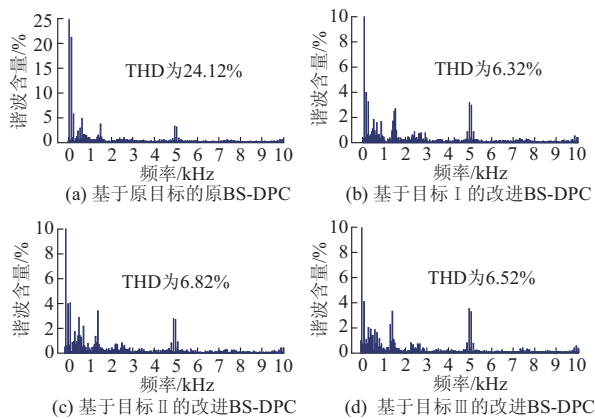


图 6 不平衡电网条件下实验电流频谱
Fig.6 Experimental current spectrum under unbalanced power grid

从图 6 可看出,不平衡电网下原方法的电流含有大量的谐波,尤其是低奇次成分,而后面的 3 种方法谐波含量大幅度减小,尤其是改进策略能抑制三相定子电流的低次谐波成分,有效地输出正弦电流。上述实验结果表明,本文提出的改进策略能够在不平衡电网条件下分别有效实现 3 个控制目标,改善转子侧变换器的运行性能。从而充分验证了本文提出的不平衡电网条件下改进 BS-DPC 的正确性和有效性。

5 结语

本文研究了双馈感应风力发电机基于反推算法的直接功率策略以及在不平衡电网条件下的改进方案。在平衡电网条件下,通过与 LUT-DPC 及 VC 的对比实验研究,验证了本文提出 BS-DPC 的正确性和有效性,其能改善电流谐波,减小有功、无功功率脉动,固定开关频率,与 VC 相比具有控制结构简

洁,需调节参数较少的优点,具有极好的实际工程应用前景。针对不平衡电网条件,能够根据电网的需求分别实现不同控制目标,且均能抑制定子电流中的低次谐波含量,改善其在不平衡电网条件下的运行性能,有助于电网的安全稳定。同时也需指出,反推算法对控制对象的参数有依赖性,但其具有的优良动态性能使其与自适应控制等方法结合而获得较强鲁棒性,值得进一步研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 刘其辉,贺益康,张建华,等.交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):51-55.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua, et al. Grid connection control strategy of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 51-55.
- [2] ZHI D, XU L. Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 110-118.
- [3] 孙丹,方扬,孙士涛,等.双馈异步风力发电机无差拍直接功率控制及延时补偿[J]. 电工技术学报,2013,28(11):70-77.
SUN Dan, FANG Yang, SUN Shitao, et al. Dead-beat direct power control of doubly fed induction generators with delay compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 70-77.
- [4] LARRINAGA S A, VIDAL M A R, OYARBIDE E, et al. Predictive control strategy for DC/AC converters based on direct power control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1261-1271.
- [5] SHANG Lei, SUN Dan, HU Jiabing, et al. Predictive direct power control of grid-connected voltage-sourced converters under unbalanced grid voltage conditions[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems, November 15-18, 2009, Tokyo, Japan: 1-5.
- [6] 郑雪梅,郭玲,徐殿国,等.双馈感应发电机空载并网的高阶滑模控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):12-16.
ZHENG Xuemei, GUO Ling, XU Dianguo, et al. High-order sliding mode control for no-load cutting-in of DFIG wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 12-16.
- [7] DEHKORDI B M, PAYAM A F, HASHEMNIA M N, et al. Design of an adaptive backstepping controller for doubly fed induction machine drives[J]. Journal of Power Electronics, 2009, 9(3): 343-353.
- [8] REBOUH S, KADDOURI A, ABDESSEMED R, et al. Adaptive backstepping speed control for a permanent magnet synchronous motor[C]// International Conference on Management and Service Science, August 12-14, 2011, Wuhan, China: 1-4.
- [9] 方一鸣,任少冲,王志杰,等.永磁同步电动机转速自适应模糊 Backstepping 控制[J]. 电机与控制学报,2011,15(6):97-102.
FANG Yiming, REN Shaochong, WANG Zhijie, et al. Adaptive fuzzy Backstepping control for speed of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(6): 97-102.
- [10] 朱林,徐敏,蔡泽祥,等.基于反步法的区域稳定控制器统一设

计[J].电力系统自动化,2010,34(7):11-15.

ZHU Lin, XU Min, CAI Zexiang, et al. Unified design of inter-area stability controllers based on backstepping method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 11-15.

[11] 董文瀚,孙秀霞,林岩.反推自适应控制的发展及应用[J].控制与决策,2006,21(10):1081-1086.

DONG Wenhan, SUN Xiuxia, LIN Yan. Adaptive backstepping control: development and applications [J]. Control and Decision, 2006, 21(10): 1081-1086.

[12] ZHANG Yan, LI Shaoyuan. Backstepping-based decentralized PID controller design for MIMO processes [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(5): 675-682.

[13] SLOTINE J, LI W. Applied nonlinear control [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1991: 122-126.

[14] 胡家兵,贺益康,郭晓明,等.不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J].电力系统自动化,2007,31(14):47-56.

HU Jiabing, HE Yikang, GUO Xiaoming, et al. Modeling and control of the DFIG based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 47-56.

孙 丹(1975—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:交流调速与风力发电技术。E-mail: sundan@zju.edu.cn

熊平化(1980—),男,硕士研究生,主要研究方向:变速恒频双馈异步风力发电技术。E-mail: 21310144@zju.edu.cn

方 扬(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向:变速恒频双馈异步风力发电技术。

(编辑 万志超)

Backstepping-based Direct Power Control of Doubly-fed Induction Wind Turbines

SUN Dan, XIONG Pinghua, FANG Yang, DENG Lunjie

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the operating performance of doubly-fed induction wind turbines, this paper proposes a direct power control (DPC) based on backstepping algorithm (BS-DPC). Firstly, a brief introduction of backstepping control is presented and the basic principle of BS-DPC is discussed in detail, then the comparative research and analysis on simulation and experimental results of look-up table DPC (LUT-DPC), vector control (VC) and BS-DPC under balanced power grid situation are proposed. The BS-DPC not only inherits excellent dynamic performance from traditional DPC, but also has excellent steady performance and decreases harmonic current and power pulsation with constant switching frequency. Secondly, the influence of unbalanced power grid on the BS-DPC is discussed, and then new control objectives and an improved control strategy based on BS-DPC are proposed. Simulation and experimental results verify the effectiveness of improved BS-DPC under unbalanced power grid condition as well.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377141) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LY13E070001).

Key words: doubly-fed induction generator; backstepping control; direct power control; unbalanced power grid; fixed switching frequency

第五届国际电力解除管制与重建及电力新技术国际会议征文通知

第五届电力解除管制与重建及电力新技术国际会议 (The 5th International Conference on electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 简称 DRPT2015) 将于 2015 年 11 月 26 ~ 29 日在长沙理工大学举办。会议由 IEEE PES、IET 和 NSFC 协办。会议以英文为工作语言,采用大会报告、专题研讨会、会前专题讲座、分组报告与张贴论文等形式进行学术交流。自第一届起,会议论文集均被 DRPT Proceedings、IEEE Xplore 和 EI 收录。

会议网站: http://www.csust.edu.cn/pub/drpt2015/	论文全文截稿日期: 2015 年 7 月 15 日
投稿、模板网址: http://www.csust.edu.cn/pub/drpt2015/DOWNLOADa/index.htm	2015 年 10 月 26 日前会员会议注册费: 2000 元
论文投稿网站: http://cms.amss.ac.cn/	学生注册费: 1500 元

征稿要求:

1. 本次会议只接收未在国内外学术刊物上公开发表,以及未在国际、国内学术会议上报告过的原创性论文;

2. 本次会议只接受 TCCT 投稿系统网上在线投稿,论文语言为英文,不接受中文稿件,具体字数、格式要求请查询投稿网址以及论文模板。

- 征稿范围:**
- Power System Operation and Management
 - Power System Analysis, Protection and Control
 - High Voltage Transmission Technology
 - New Energy Power Generation and Micro-grid Technology
 - Smart Grid Technology
 - Energy Internet and New Emerging Technologies