

基于预测虚拟转矩控制的 DFIG 并网逆变方法

曹晓冬¹, 杨世海¹, 支亚薇¹, 方磊²

(1. 国网电力需求侧管理技术实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院),
江苏 南京 211103; 2. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:针对双馈风力发电机组(DFIG)高性能并网控制问题,提出一种 DFIG 并网逆变系统预测虚拟转矩控制方法。虚拟转矩的概念衍生于直接转矩控制中的电磁转矩,是由 DFIG 的转子磁链和电网虚拟磁链合成产生的。在建立 DFIG 并网逆变系统数学模型的基础上,分析了不同扇区中电压矢量对系统虚拟转矩、转子磁链的影响趋势,选取一个包含两个有效电压矢量和一个零电压矢量的三矢量序列,并给出功率无差拍跟踪时的矢量作用时间求取方法。最后,基于 55 kW 双馈风力发电实验样机对所提预测虚拟转矩方法进行性能验证。实验结果表明,该方法可实现 DFIG 系统平滑、无冲击并网,保证了并网接入点的动、稳态电能品质。

关键词:双馈风力发电; 并网逆变; 虚拟转矩; 预测转矩控制

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)02-0032-06

0 引言

随着全球范围的能源危机日趋严重,可再生清洁能源的开发利用逐渐成为关注热点^[1-3]。并网逆变器作为分布式发电连接电网的接口,在风力发电、光伏发电和燃料电池发电等分布式发电中具有重要作用,甚至在一定程度上决定了分布式发电所能提供的电能质量^[4-5]。并网技术是风力发电机安全、高效运行的重要前提和条件,当风速变化时发电机可能会发生多次并(脱)网操作^[6]。随着单机容量逐渐增大,并网安全性也将更加突出,如海上风机单机容量一般在兆瓦级以上,大功率机组的定子漏阻抗很小,微小的并网压差就可能产生破坏性的冲击电流^[7],从而引起电网电压的大幅下降^[8],导致较大的冲击和震荡^[9],严重时甚至会损坏发电机组^[10-12]。

针对双馈风力发电机组(doubly fed induction generator, DFIG)高性能并网控制问题,国内外学者开展了相关研究。其中,文献[13-14]围绕传统矢量控制下 DFIG 优化问题展开,分别给出了不同磁链定向方式下的解决方案,但实际工程应用中 DFIG 系统性能受矢量控制调节器参数影响较大;文献[15]介绍了一种 DFIG 直接功率控制方法,采取查找表方式获取最优开关状态并直接输出,系统动态性能好、参数敏感度低,但其存在开关频率不固定问题、功率脉动问题。模型预测控制作为近年来电

力电子领域热门研究方向,文献[16-18]提出了一种 DFIG 预测功率控制方法,虽然一定程度克服了传统 DPC 功率脉动问题,但其开关频率不固定特性仍然存在。

对此,文中提出一种 DFIG 并网逆变系统预测虚拟转矩控制方法,在建立 DFIG 并网逆变系统数学模型的基础上,分析了不同扇区中电压矢量对系统虚拟转矩、转子磁链的影响趋势。选取一个包含两个有效电压矢量和一个零电压矢量的三矢量序列,并给出功率无差拍跟踪时的矢量作用时间求取方法。仿真、实验结果论证了所提方法在系统平滑、无冲击并网等指标方面的可行性和优越性。

1 DFIG 系统建模

1.1 数学模型

图 1 所示为风力发电系统原理框图,DFIG 经公共连接点(point of common coupling, PCC)与线性、非线性负载连接。为了研究双馈风力发电系统预测虚拟转矩及功率控制,建立系统数学建模如下。

定、转子电压方程:

$$\mathbf{V}_s = R_s \mathbf{I}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} + j\omega_r \boldsymbol{\psi}_s \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_r = R_r \mathbf{I}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} \quad (2)$$

定、转子磁链方程:

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{I}_s + L_m \mathbf{I}_r \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = L_m \mathbf{I}_s + L_r \mathbf{I}_r \quad (4)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda L_m \text{Im}\{\boldsymbol{\psi}_r^* \boldsymbol{\psi}_s\} \quad (5)$$

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2018-10-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901100);

国家电网有限公司总部科技项目(5210EF18000M)

并网功率方程:

$$P_s = \frac{3}{2} \omega_1 \lambda L_m \text{Im} \{ \psi_r^* \psi_s \} \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \omega_1 \lambda [L_r |\psi_s|^2 - L_m \text{Re} \{ \psi_r^* \psi_s \}] \quad (7)$$

式中: V_s, V_r 分别为定、转子电压矢量; I_s, I_r 分别为定、转子电流矢量; ψ_s, ψ_r 分别为定、转子磁链; ω_1 为电网角频率; L_m, L_s, L_r 分别为互感、定子电感和转子电感; T_e 为电磁转矩; p 为绝对数; λ 为磁化系数。

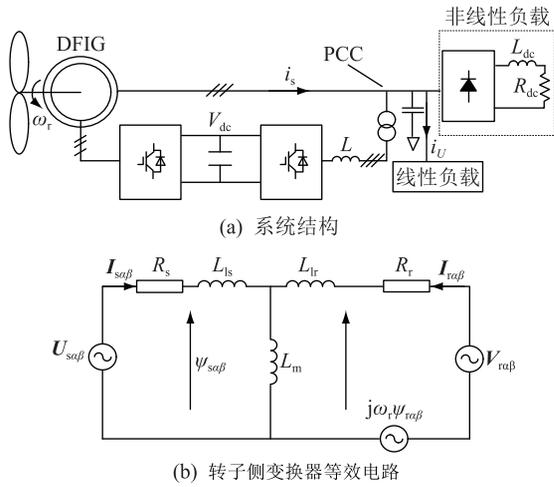


图1 双馈风力发电系统原理

Fig.1 The principle of DFIG system

1.2 虚拟转矩概念

虚拟转矩 T_v 的概念衍生于直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 中的电磁转矩 T_{em} , 其中虚拟转矩 T_v 是由实际 DFIG 的转子磁链 ψ_r 和电网虚拟磁链 ψ_g 产生的, 如图 2 所示。电网虚拟磁链 ψ_g 为:

$$\psi_g = \int V_g dt \quad (8)$$

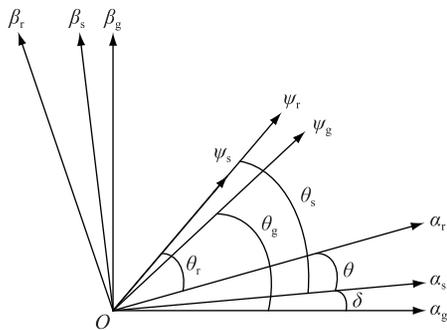


图2 虚拟转矩矢量关系

Fig.2 Virtual torque vector diagrams

此时, 图 2 中 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的虚拟电磁转矩 T_v 为:

$$T_v = \frac{3}{2} p \lambda L_m (|\psi_g| |\psi_r| \sin \delta) \quad (9)$$

式中: δ 为磁链夹角。

为了实现并网电压同步来避免 DFIG 系统冲击, 需要保证定子电压矢量 V_s 与电网电压矢量 V_g 相位精确同步, 可转化为 $\psi_s = \psi_g$ 。因此, 需要控制同步并网期间 DFIG 系统电磁转矩 $T_e = 0$ 。考虑到脱网运行时 DFIG 定子端的开路式结构, 此时 ψ_s 与 ψ_r 保持同相位关系, 因此控制 ψ_r 与 ψ_g 同相位将会强制使 ψ_s 与 ψ_g 同相位, 从而实现 DFIG 机组无冲击并网运行。将 ψ_r 与 ψ_g 同相位的代入式(9)中, 可得:

$$T_v = \frac{3}{2} p \lambda L_m (|\psi_g| |\psi_r| \sin \delta) = 0 \quad (10)$$

为了匹配并网电压 V_s 与电网电压 V_g 的幅值, 即控制 $|\psi_s| = |\psi_g|$, 根据定、转子磁链关系式(3)、(4)可得:

$$\psi_r = \frac{L_r}{L_m} \psi_s = \frac{L_r}{L_m} \psi_g \quad (11)$$

将式(8)代入式(11)可得转子磁链 ψ_r 与电网电压 V_g 关系为:

$$\psi_r = \frac{L_r}{L_m} \frac{V_g}{j \omega_1} \quad (12)$$

为此, 为了实现并网电压幅值匹配需要控制转子磁链幅值给定值为:

$$|\psi_r^*| = \frac{L_r |V_g|}{L_m \omega_1} \quad (13)$$

2 预测虚拟转矩控制

为了实现对 DFIG 风力发电机组无冲击并网运行, 提出双馈风力发电系统预测虚拟转矩控制方法。该方法通过预测 DFIG 虚拟转矩及转子磁链未来变化趋势, 采取合理的三段式矢量选取及作用时间分配机制, 实现了对虚拟转矩的高精度、无差跟踪控制。

2.1 转矩/磁链变化规律

图 3 所示为转子侧变流器可输出的 8 个电压空间矢量 $V_0 - V_7$ 。为了实现对转矩、磁链分量的控制, 须对这 8 个电压矢量对应系统状态的变化规律加以分析。

对式(10)中虚拟磁链 T_v 表达式进行偏微分处理如下:

$$\frac{dT_v}{dt} = \frac{3}{2} p \lambda L_m \text{Im} \left\{ \frac{d\psi_r^*}{dt} \psi_g + \psi_r^* \frac{d\psi_g}{dt} \right\} \quad (14)$$

代入式(2)、式(8)一式(14)可得化简后转矩变化率为:

$$\frac{dT_v}{dt} = \frac{3}{2} p \lambda L_m \text{Im} \left\{ V_r^* \psi_g - \frac{R_r}{L_r} \psi_r^* \psi_g + \psi_r^* V_g \right\} \quad (15)$$

同理, 对式(4)进行微分处理可得转子磁链变

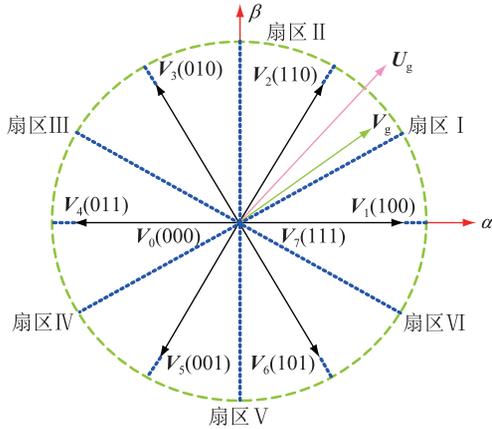


图3 电压矢量及其扇区划分原理

Fig.3 Voltage vectors and sectors dividing principle

化率为:

$$\frac{d|\psi_r|}{dt} = \frac{1}{|\psi_r|} \left[\operatorname{Re}(\mathbf{V}_r^* \mathbf{V} \psi_r) - \lambda R_r L_s |\psi_r|^2 + \lambda R_r L_m \operatorname{Re}\{\psi_r^* \psi_s\} \right] \quad (16)$$

分析式(15)、式(16)可知,DFIG 虚拟转矩、转子磁链的变化率是一个由转子端口电压 \mathbf{V}_r^* 、系统磁链 ψ_s 、 ψ_r 以及 DFIG 参数 R_s 、 R_r 、 L_s 、 L_m 等共同组成的高阶模型,其中转子端口电压 \mathbf{V}_r^* 为系统控制变量。因此,当 VSI 端口输出固定电压矢量时 \mathbf{V}_i 时,对应的转矩、磁链变化率为:

$$\begin{cases} \delta_{T_v} = \frac{dT_v}{dt} \Big|_{v=v_i} \\ \delta_{\psi_r} = \frac{d\psi_r}{dt} \Big|_{v=v_i} \end{cases} \quad (17)$$

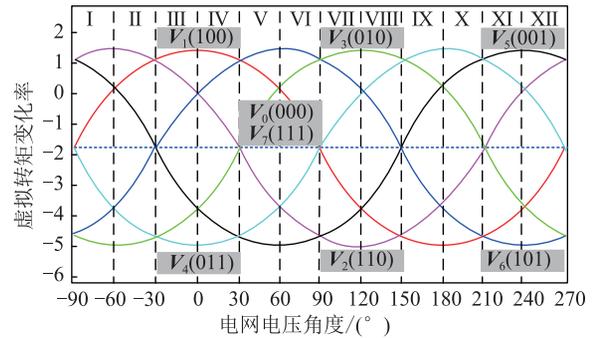
式中: i 为转子侧环流器输出端口电压的矢量标号, $i \in [0, 7]$ 。因此,在较短的作用时间 T_i 下的转矩、磁链线性轨迹可以被描述为:

$$\begin{cases} T_{v(i+1)} = T_{v(i)} + \delta_{T_v} T_i \\ \psi_{r(i+1)} = \psi_{r(i)} + \delta_{\psi_r} T_i \end{cases} \quad (18)$$

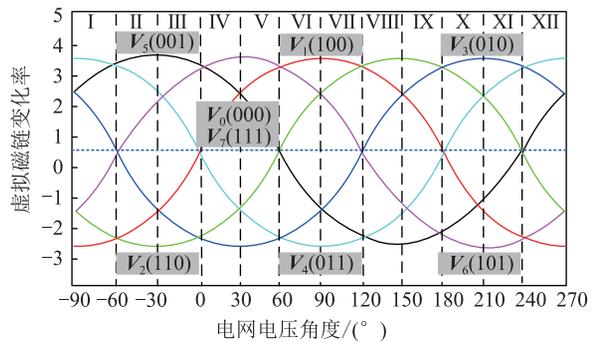
2.2 电压矢量选取

图4所示为式(15)、(16)中虚拟转矩、转子磁链变化率在一个基波周期 360° 内的变化规律。分析图4可知,当电网电压矢量位于扇区 I 时,只有电压矢量 \mathbf{V}_1 保持 $dT_v/(dt)$ 小于 0,即施加电压矢量 \mathbf{V}_1 会使虚拟转矩 T_v 减小,因此在扇区 I 时,电压矢量 \mathbf{V}_1 是必选的矢量。根据最小开关损耗的原则,可确定第三个零电压矢量需选择矢量 \mathbf{V}_7 。此时控制系统核心问题即如何根据转子磁链变化规律分析确定第二个辅助电压矢量。从图3可看出,施加 \mathbf{V}_1 会使转子磁链变化率 $d\psi_r/(dt)$ 的值小于 0,而电压矢量 \mathbf{V}_7 作用同样会使得转子磁链变化率 $d\psi_r/(dt)$ 的

值小于 0。因此在扇区 I 中,第二根矢量需选择能够使转子磁链变化率 $d\psi_r/(dt)$ 的值大于 0 的矢量,故应选 \mathbf{V}_2 。因此在扇区 I 中选择电压矢量 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 、 \mathbf{V}_7 。同理,可将上述电压矢量选定方法推广应用至扇区 II 至 VI。



(a) 虚拟转矩变化率



(b) 虚拟磁链变化率

图4 有功及无功功率变化率

Fig.4 Changing rate of active and reactive power

2.3 作用时间求取

如图5所示为第 k 控制周期虚拟转矩、转子磁链的变化趋势图,对三电压矢量 (\mathbf{V}_{a1} 、 \mathbf{V}_{a2} 、 \mathbf{V}_z) 进行七段式划分,对应的三矢量作用时间分别为 T_a 、 T_b 、 T_z ,则在控制周期结束时刻的 T_v 、 ψ_r 跟踪误差值为:

$$\begin{cases} E_{T_v} = T_v^* - T_v^{k+1} = T_v^* - T_v^k - S_a^T T_a - S_b^T T_b - S_c^T T_z \\ E_{\psi_r} = \psi_r^* - \psi_r^{k+1} = \psi_r^* - \psi_r^k - S_a^{\psi_r} T_a - S_b^{\psi_r} T_b - S_c^{\psi_r} T_z \end{cases} \quad (19)$$

为了最大程度地抑制转矩、磁链抖动现象,实现高精度、无差拍跟踪控制效果,采取最小二乘法构建一个功率跟踪误差价值函数如下:

$$g = E_{T_v}^2 + E_{\psi_r}^2 \quad (20)$$

求解式(9)对 T_a 、 T_b 的导数为:

$$\begin{cases} \frac{\partial g}{\partial T_a} = 0 \\ \frac{\partial g}{\partial T_b} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

联立式(19)一式(21)可以求得三电压矢量作用时间为:

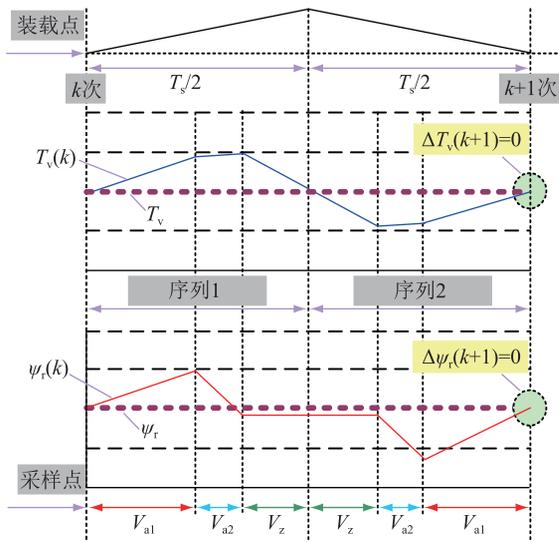


图5 三矢量七段式作用时间分配

Fig.5 Three vector seven section time allocations

$$\begin{cases} T_a = \frac{T_{err}(s_b^\psi - s_c^\psi) + \psi_{err}(s_c^T - s_b^T) + T_s(s_c^\psi s_b^T - s_b^\psi s_c^T)}{s_c^\psi s_b^T + s_a^\psi s_c^T + s_b^\psi s_a^T - s_a^\psi s_b^T - s_b^\psi s_c^T - s_c^\psi s_a^T} \\ T_b = \frac{T_{err}(s_c^\psi - s_b^\psi) + \psi_{err}(s_b^T - s_c^T) + T_s(s_a^\psi s_c^T - s_c^\psi s_a^T)}{s_c^\psi s_b^T + s_a^\psi s_c^T + s_b^\psi s_a^T - s_a^\psi s_b^T - s_b^\psi s_c^T - s_c^\psi s_a^T} \\ T_z = T_s - T_a - T_b \end{cases} \quad (22)$$

式中: T_a, T_b, T_z 分别为三电压矢量对应的作用时间; $T_{err} = T_v^* - T_v^k, \psi_{err} = \psi_r^* - \psi_r^k$; S_a^T, S_b^T, S_c^T 分别为三电压矢量对应的虚拟转矩变化率, $S_a^\psi, S_b^\psi, S_c^\psi$ 分别为三电压矢量对应的转子磁链变化率。

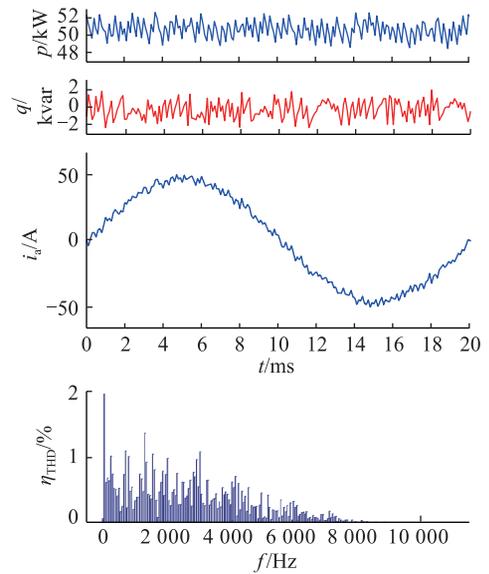
3 仿真对比分析

为论证所提基于预测虚拟转矩控制的分布式DFIG并网逆变方法的有效性,本节基于 Matlab/Simulink 软件进行 DFIG 驱动系统仿真分析,其中仿真系统核心参数如下:电网电压为 380 V/50 Hz;滤波电抗器为 1.8 mH;DFIG 电机功率为 45 kW、极对数为 2、互感为 2.436 mH、定转子电阻为 0.218 Ω 。

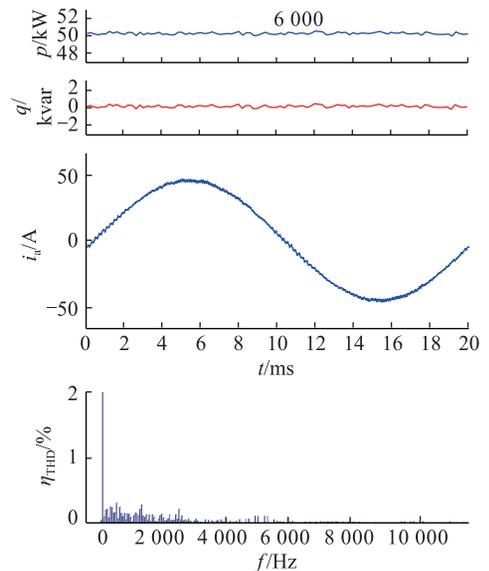
图 6 给出了传统预测功率控制与预测虚拟转矩控制稳态仿真对比结果。可见,预测虚拟转矩控制无论在功率脉动、电流畸变率以及低频谐波分量上较传统预测功率控制均具备优势。其中,以网侧电流总畸变率 η_{THD} 为对比项,在 5 kHz 开关频率下,传统预测功率控制网侧 $\eta_{THD} = 5.61\%$,预测虚拟转矩控制网侧 $\eta_{THD} = 2.06\%$,更适用于 DFIG 并网需求。

4 实验验证

为进一步验证所提预测虚拟转矩控制方法的工程适用性,搭建了 1 台 55 kW 双馈风力发电机组



(a) 预测功率控制



(b) 预测虚拟转矩控制

图6 仿真对比结果

Fig.6 Simulation comparison results

并网逆变系统的实验样机,实验部分参数与仿真模型保持一致。

图 7 为孤岛运行模式下 DFIG 系统稳态实验结果,图中自上而下为:转子侧电流 i_{rabc} 、定子侧电流 i_{sabc} 、定子电压 V_{sabc} 及其 FFT 频谱。图 7(a) 中自 20 ms 时刻起 DFIG 转子侧电流 i_{rabc} 建立迅速且稳定, i_{rabc} 保持三相对称且正弦度较高。图 7(b) 中定子侧未并入电网使得 i_{sabc} 幅值接近于零,波形表现为高频谐波分量,上述谐波分量由逆变器输出 PWM 电压波形中高频谐波成分产生,保证了孤岛供电电压的高正弦度调制。图 7(c) 为并网 A 相电压 2 周期放大波形,图中电压 V_{ca} 正弦度高且纹波抖动小,对应的 FFT 频谱分析结果中总畸变率为 $\eta_{THD} = 2.6\%$,且在 10 kHz 低频段内电压频谱中无特征次谐波点,

有效保证了 DFIG 孤岛运行模式下对本地负载的供电品质。

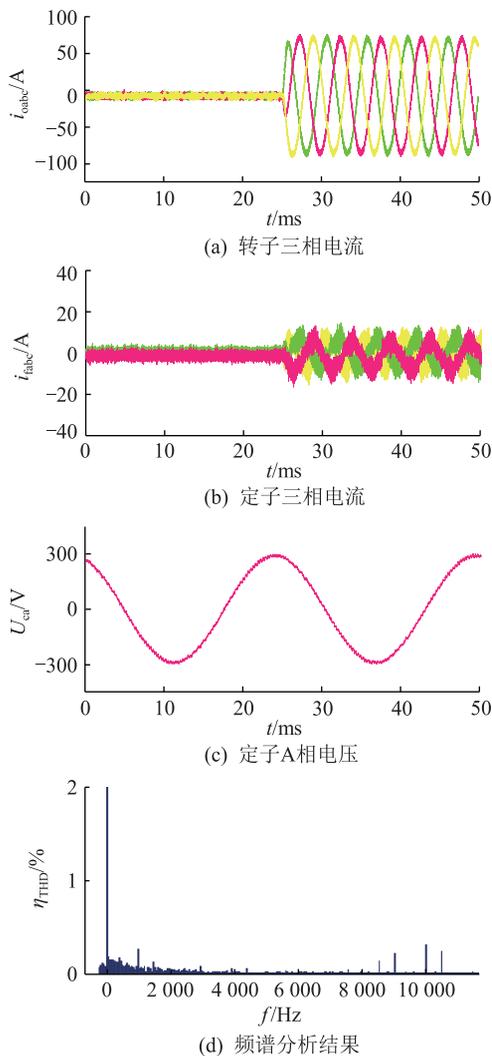


图7 孤岛供电状态稳态控制结果

Fig.7 Steady experiment results for isolated power supply system

图8为DFIG系统由孤岛供电模式同步切换至并网逆变模式实验结果,自上而下分别为:A相定子侧电压 V_{sa} 、A相电网电压 V_{ga} 以及DFIG转子侧三相电流 i_{rabc} 。图8中50ms时刻起,DFIG定子侧输出电压 V_{sa} 仅需不足1ms时间即开始完成与电网电压 V_{ga} 的幅值、相位的同步匹配,电压匹配之后两者的幅值、频率和相角在0.15s之后达到保持精确一致。整个电压切换过程平滑且无过流现象发生,验证了文中分析的虚拟转矩控制在抑制DFIG系统冲击方面的有效性。

图9为DFIG发电系统在并网逆变模式下功率调节实验结果,图9(a)有功功率 P 在0.22s和0.25s分别进行了20kW升降调节,此过程有功功率响应迅速(小于5ms)且无超调。与此同时,无功功率 Q 始终保持在0kvar附近波动,整个过程中 P 、 Q 之

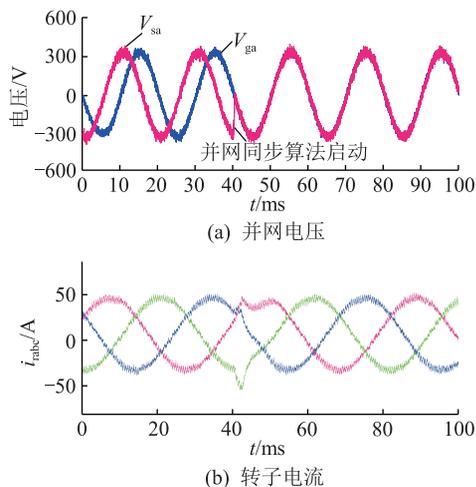


图8 并网电压同步切换控制效果

Fig.8 Dynamic experiment results

间保持优异的解耦性能。随后,0.27s和0.29s分别进行了无功功率 Q 的20kvar升降实验,与有功功率 P 突变实验效果一致。分析图9(b)中DFIG定子侧输出电流 i_{sabc} 可知,其幅值及相位与系统功率 P 、 Q 变化规律保持一致,保持较好正弦度的同时无过流现象发生,验证了DFIG系统预测虚拟转矩控制在功率动态调节方面的显著优势。

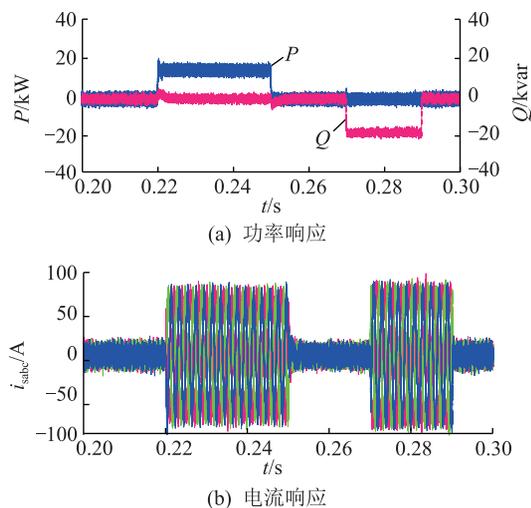


图9 动态实验结果

Fig.9 Dynamic experiment results

5 结论

为了克服双馈风力发电机组并网冲击问题,提出一种DFIG并网逆变系统预测虚拟转矩控制方法,并基于55kW样机对所提方法进行性能验证,可以得出以下结论:

(1) 将预测虚拟转矩控制技术应用于DFIG并网逆变系统中,可实现DFIG系统平滑、无冲击并网,保证了并网接入点的动、稳态电能品质;

(2) 预测虚拟转矩技术直接对 DFIG 转矩、磁链变量进行控制,保留了传统 DTC 高动态响应、无需 PWM 调制的优势,同时采取的三矢量技术克服了传统 DTC 中开关频率不固定的缺点。

参考文献:

- [1] 吴霜,季聪,孙国强. 含分布式储能的配电网多目标运行优化策略研究[J]. 电力工程技术,2018,37(02):20-26.
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage[J]. Electric power Engineering Technology, 2018,37(02):20-26.
- [2] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(01):1-8.
JIN Chu, LIJiaming, XU Shenzi, et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system[J]. Electric power Engineering Technology, 2017,36(01):1-8.
- [3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):2-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):2-14.
- [4] 赵伟然,汪海蛟,李光辉,等. 分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J]. 电力工程技术,2017,36(6):20-26.
ZHAO Weiran, WANG Haijiao, LI Guanghui, et al. Voltage and power factor coordination control for distributed photovoltaic integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):20-26.
- [5] BAO X, ZHUO F, TIAN Y, et al. Simplified feedback linearization control of three-phase photovoltaic inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6):2739-2752.
- [6] 吴子双,于继来,彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报,2013,28(5):112-119.
WU Zishuang, YU Jilai, PENG Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transaction of China Electro Technical Society, 2013, 28(5):112-119.
- [7] 刘璇,李琦,乐波,等. DFIG 风场并网柔直系统的启动策略研究[J]. 电力电子技术,2016(11):39-41.
LIU Xuan, LI Qi, YUE Bo, et al. Starting-up control of HVDC system for integrating DFIG-based wind farm[J]. Power Electronics, 2016(11):39-41.
- [8] 荣飞,朱斌,黄守道,等. 基于前馈补偿的双馈风力发电控制系统[J]. 电力电子技术,2015,49(9):34-36.
RONG Fei, ZHU Bin, HUANG Shoudao, et al. DFIG wind generation control system based on feedforward compensation[J]. Power Electronics, 2015, 49(9):34-36.
- [9] 李涛涛,贾嵘,尹浩霖,等. 风力发电机组状态监测系统设计与应用[J]. 电网与清洁能源,2016,32(1):95-99.
LI Taotao, JIA Rong, YIN Haolin, et al. Design and application

of condition monitoring system for wind turbine generator unit [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 49(9):34-36.

- [10] 朱玲,王建锋,时维俊. 基于变流器网侧电流的双馈风力发电机转子绕组故障诊断[J]. 江苏电机工程,2016,35(3):76-79,83.
ZHU Ling, WANG Jianfeng, SHI Weijun. Double-fed induction generator rotor fault diagnosis based on grid-side current of back-to-back converter[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016,35(3):76-79,83.
- [11] GUO W, XIAO L, DAI S. Enhancing low-voltage ride-through capability and smoothing output power of DFIG with a superconducting fault-current limiter-magnetic energy storage system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2):277-295.
- [13] ANANTH D V N, KUMAR G V N. Fault ride-through enhancement using an enhanced field oriented control technique for converters of grid connected DFIG and STATCOM for different types of faults[J]. Isa Transactions, 2016, 62:2-18.
- [14] 王向东,李湘宸,黄利刚. 基于定子电压定向矢量控制系统的改进研究[J]. 自动化技术与应用,2015,34(11):19-24.
WANG Xiangdong, LI Xiangchen, HUANG Ligang. Research on the improvement of stator voltage oriented vector control system[J]. Industry Control and Applications, 2015, 34(11):19-24.
- [15] IAZNLO A, GHOLAMIAN S A, KAZEMI M V. Using of four-switch three-phase converter in the structure DPC of DFIG under unbalanced grid voltage condition[J]. Electrical Engineering, 2017(3):1-14.
- [16] 赵梅花,阮毅,宋文祥,等. DFIG 的 SVM-IPC 与 SVM-DPC 比较[J]. 电机与控制学报,2014,18(9):68-73.
ZHAO Meihua, RUAN Yi, SONG Wenxiang, et al. Comparison of indirect power control and direct power control for doubly-fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(9):68-73.
- [17] KOU P, LIANG D, Li J, et al. Finite-control-set model predictive control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2017, 32(99):1-10.
- [18] LI Xiaoming, ZHANG X, LIN Z, et al. Adaptive multiple MPC for a wind farm with DFIG[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2016, 11(5):1116-1127.

作者简介:



曹晓冬

曹晓冬(1990),男,博士,工程师,从事电力需求侧管理、智能用电技术研究工作(E-mail:cumtcd@126.com);

杨世海(1976),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力需求侧管理、智能用电技术研究工作;

支亚薇(1990),女,硕士,助理工程师,从事电力需求侧管理研究工作。

(下转第 98 页)

Load coordination forecasting method based on information re-modification

CHEN Yiwei¹, GAO Qiang¹, WANG Linmei¹, LI Xiulei², LIU Lixin³

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou 318000, China; 2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China; 3. Beijing Tsingsoft Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The accuracy of load forecasting and the matching of planning are becoming more and more important. Due to the existence of forecasting errors, the results of different levels of load forecasting will be inconsistent and inconsistent in multilevel load forecasting. To solve this problem, a load coordination forecasting method based on information re-amendment is proposed. Firstly, the reliability of the prediction results is calculated by taking the prediction error of the prediction results one year before the prediction as the prior reference sequence, then the difference of load forecasting before and after the coordination of forecasting years under the same forecasting method is taken as a new reference sequence. Replace the original reference sequence, re-correct the information, and obtain new credibility. The coordination forecasting model is established by using this credibility, and then the coordination results are obtained. Finally, the correctness of the proposed method is verified by the analysis and calculation of an example.

Keywords: load coordination forecasting; grey correlation theory; reliability; information re-modification

(编辑 方晶)

(上接第 37 页)

The predictive virtual torque control method for distributed DFIG grid connected inverter system

CAO Xiaodong¹, YANG Shihai¹, ZHI Yawei¹, FANG Lei²

(1. State Grid Electric Power Demand Side Management Techniques Laboratory (State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China; 2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: To solve the high performance control grid-connected control problem of doubly fed induction generator (DFIG), we propose a predictive virtual torque control method for distributed DFIG grid connected inverter system. Virtual torque is derived from the concept of direct torque control in motor driven system. It is synthesized from the rotor flux of DFIG and the virtual flux of grid. On the basis of establishing the mathematical model of the DFIG grid-connected inverter system. The effects of voltage vectors in different sectors on virtual torque and rotor flux are analyzed. Sequence of three vectors containing two effective voltage vectors and a zero voltage vector are selected, and it also give a method to calculate the vector action time to make the power tracking. Finally, the performance of the proposed method is verified based on the 55 kW DFIG experimental prototype. The experimental results show that this method can achieve the DFIG system smooth and shock free grid-connection, and guarantee the dynamic and steady power quality of the grid-connection point.

Keywords: doubly fed induction generator; grid connected inverter; virtual torque; predictive torque control

(编辑 钱悦)