

永磁直驱风电网侧变换器并网控制的研究

针对永磁直驱风电网侧变换器,采用电网电压定向控制,具有提高网侧变换器的动静态性能、控制简单的优势。详细阐述了电网电压定向控制机理,建立了网侧变换器的数学模型,采用有功、无功功率独立控制实现了功率因数可调,采用前馈解耦控制和电压外环电流内环双闭环控制策略以稳定直流侧电压,满足并网要求。利用Matlab/Simulink搭建永磁直驱风电网侧变换器的仿真模型,验证了永磁直驱风电网侧变换器采用电压定向控制的正确性。

高红岩 陶彩霞/兰州交通大学自动化与电气工程学院



高红岩/硕士研究生

随着人们对风能开发利用的不断提高,永磁直驱型风电系统省去了成本高、易坏的齿轮箱和外部励磁装置,简化了结构,降低了成本,可靠性提高,得到越来越多的关注^[1]。永磁直驱发电机通过全功率变换器与电网相连,双PWM变换器采用SVPWM控制技术,具有使电压利用率提高、控制简单和可靠性高等优点,具有广阔的应用前景^[2]。而对双PWM的网侧变换器的准确控制将起到保证电能质量的核心作用。

目前,国外主要在网侧变换器数学模型的建立、控制策略上研究较多^[3-5]。国内也对风电并网控制广泛关注,文献[6]并网控制策略采用虚拟磁链控制,但参数整定复杂。文献[7]采用直接功率并网控制策略,但电网电压畸变时对有功、无功功率的计算影响较大。文献[8]采用电网电压定向控制策略,但并没有对无功功率的控制做仿真分析。因此,在网侧变换器并网控制方面继续做深入的研究是必要的。本文采用电网电

压定向控制、有功、无功功率独立控制、前馈解耦控制和电压外环电流内环双闭环控制策略,对该网侧变换器并网控制做了详细全面的分析,并在Matlab/Simulink下搭建了仿真模型,对仿真结果进行分析研究。

永磁直驱风电网侧变换器的结构和数学模型

永磁直驱风电网侧变换器的结构如图1所示。为了分析简便,首先做如下假设:①电容和电感均为理想器件,电容值足够大,电感值忽略饱和;②网侧逆变器设定为理想的器件^[9];③电网设定为理想对称的三相电压源。将风机、永磁同步电动机和机侧变换器等效为受控电压源 E 和电阻 R 的串联结构。

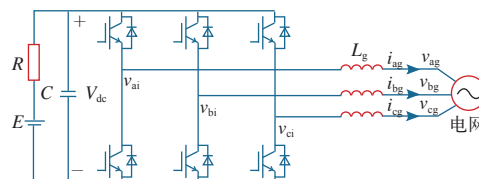


图1 网侧变换器的结构

永磁直驱风电网侧变换器电路的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_{ag}}{dt} = (v_{ag} - v_{ai}) / L_g \\ \frac{di_{bg}}{dt} = (v_{bg} - v_{bi}) / L_g \\ \frac{di_{cg}}{dt} = (v_{cg} - v_{ci}) / L_g \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_{ag} 、 i_{bg} 和 i_{cg} 为网侧三相电流, A; v_{ag} 、 v_{bg} 和 v_{cg} 为网侧三相电压, V; v_{ai} 、 v_{bi} 和 v_{ci} 为逆变器输出三相电压, V; L_g 为网侧电感值, H。

将式(1)变换到同步旋转坐标系

关键词/Keywords

永磁直驱风电 ·
网侧变换器 ·
电压定向控制 ·
并网 ·

甘肃省自然科学基金资助项目(1212RJZA073)。

下, 即

$$\begin{cases} \frac{di_{dg}}{dt} = (v_{dg} - v_{di} + w_g L_g i_{qg}) / L_g \\ \frac{di_{qg}}{dt} = (v_{qg} - v_{qi} - w_g L_g i_{dg}) / L_g \end{cases} \quad (2)$$

式中, i_{dg} 、 i_{qg} 分别为网侧 d 轴、 q 轴电流分量, A; v_{dg} 、 v_{qg} 分别为网侧 d 轴、 q 轴电压分量, V; v_{di} 、 v_{qi} 为逆变器输出 d 轴、 q 轴电压分量, V; w_g 为同步旋转坐标系的角速度, rad/s。

网侧逆变器通过SVPWM调制技术控制其触发信号, 使逆变器交流侧输出电压跟踪有功功率、无功功率的变化, 实现网侧电压频率、幅值稳定, 电流接近正弦和直流母线电压的稳定。

网侧变换器的控制策略

由于直流侧电压跌落会导致交流侧电压电流发生畸变, 直流侧电压泵升会对逆变器的开关管造成损坏^[10], 故并网控制的目的之一是稳定直流侧电压。目的二是实现网侧功率因数调节方便、电网电压频率幅值稳定和网侧电流接近正弦谐波含量少。

永磁直驱风电网侧变换器的控制如图2所示。由图2可知, 在并网控制中, 首先检测到网侧电流电压值经过abc/dq变换后实现电压定向和得到有功、无功电流的实际值, 检测到的直流母线电压与参考值比较后经过电压外环PI调节器调节得到有功电流参考值, 无功功率设定值计算得到无功电流的参考值, 通过电流内环控制和前馈解耦控制得到逆变器网侧电压参考值, 再通过SVPWM控制得到逆变器的触发信号, 控制逆变器的输出电压, 实现并网控制。静止坐标系变换到同步旋转

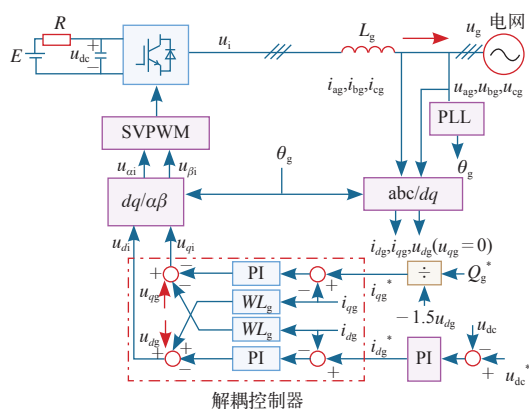


图2 网侧变换器的控制框图

坐标系能够使三相电流、电压变为同步旋转的直流量使控制变得更加容易^[11]。采用锁相环技术准确锁定电网电压的相位为坐标变换提供相位角, 并且能够稳定网侧交流电的频率。

1. 电网电压定向控制

同步旋转坐标系与电网电压矢量 v_g 同步旋转, 并且电网电压矢量 v_g 与同步旋转坐标系的 d 轴重合, 即 $v_{dg} = v_g$, $v_{qg} = 0$, 则实现了电网电压定向控制。图3为电网定向控制矢量图, 设电网三相电压为

$$\begin{cases} v_{ag} = v_g \cos \omega_g t \\ v_{bg} = v_g \cos (\omega_g t - 120^\circ) \\ v_{cg} = v_g \cos (\omega_g t - 240^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_{ag} 、 v_{bg} 和 v_{cg} 为电网三相电压, V; v_g 为电网电压幅值, V; w_g 为电网电压角速度, rad/s。

式(3)经过abc/dq变换得到: $v_{dg} = v_g$, $v_{qg} = 0$; 实现了电网电压定向控制。

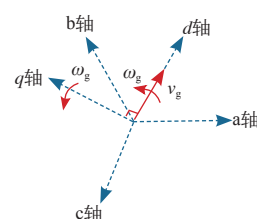


图3 电网电压定向控制矢量图

2. 有功、无功功率独立控制

输入到电网的有功功率 P 和无功功率 Q 为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \\ Q = \frac{3}{2} (v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, v_{dg} 、 v_{qg} 分别为网侧 d 轴、 q 轴电压分量, V; i_{dg} 、 i_{qg} 为网侧 d 轴、 q 轴电流分量, A; P 为注入到电网中的有功功率, W; Q 为注入到电网中的无功功率, var。

基于电网电压定向时, 即 $v_{dg} = v_g$, $v_{qg} = 0$, 由式(4)可得

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} v_g i_{dg} \\ Q = -\frac{3}{2} v_g i_{qg} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当电网电压 v_g 不变时, 通过控制 i_{dg} 、 i_{qg} 就可以分别独立控制有功功率 P 和无功

功率 Q 。当令 $i_{qg}=0$ 时,无功功率 $Q=0$,实现逆变器单位功率因数运行。

3. 前馈解耦控制

为使PI调节器的设计更加容易采用前馈解耦控制,由式(2)可推出逆变器交流侧输出电压采用前馈解耦控制的表达式为

$$\begin{cases} v_{di} = -(k_1 + k_2/s)(i_{dg}^* - i_{dg}) + w_g L_g i_{qg} + v_{dg} \\ v_{qi} = -(k_1 + k_2/s)(i_{qg}^* - i_{qg}) + w_g L_g i_{dg} + v_{qg} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $(k_1 + k_2/s)$ 是PI调节器的传递函数; v_{di} 、 v_{qi} 分别为逆变器输出 d 轴、 q 轴电压分量, V; v_{dg} 、 v_{qg} 分别为网侧 d 轴、 q 轴电压分量, V; i_{dg} 、 i_{qg} 分别为网侧 d 轴、 q 轴电流分量, A; i_{dg}^* 、 i_{qg}^* 分别为网侧 d 轴、 q 轴电流分量参考值, A; w_g 为电网电压角速度, rad/s; L_g 为网侧电感值, H。

前馈解耦控制的输出 v_{di} 和 v_{qi} 经过 $dq/\alpha\beta$ 变换后,通过SVPWM调制得到逆变器的驱动信号,控制逆变器的输出,实现并网。

4. 双闭环控制

双闭环控制由电流内环和电压外环组成。电压外环控制是为了稳定直流母线电压和为有功电流提供参考值 i_{dg}^* ,电流内环控制的目的是实现对有功、无功电流的无静差控制。

当忽略扰动且时间常数足够小时,典型I型系统具有优良快速跟踪性能,更适合电流内环的设计。故当采用典型I型系统时得到其开环传递函数为

$$P(s) = \frac{K_{IP} K_{PWM}}{R \tau_1 s (1.5 T_s + 1)} \quad (7)$$

式中, τ_1 、 K_{IP} 为电流环PI调节器参数; K_{PWM} 为SVPWM环节电压增益; T_s 为SVPWM的采样时间常数, s。电流环传递函数结构如图4所示。

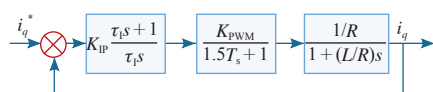


图4 电流环传递函数结构图

电压环忽略负载扰动,由于典型II型系统具有更好的稳定性,更适合直流电压的稳定,故电压环采用典型II型系统设计。电压环开环传递函数为

$$P(s) = \frac{0.75 K_v (T_v s + 1)}{C T_v s^2 (T_{cv} s + 1)} \quad (8)$$

式中, T_v 、 K_v 为电压环PI调节器参数; C 为直流侧电容值, F; T_v 为电压采样时间常数, s; T_s 为SVPWM的采样时间常数, s; $T_{cv} = T_v + 3 T_s$ 。电压环简化的传递函数结构如图5所示。

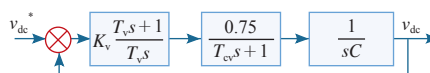


图5 电压环传递函数结构图

网侧变换器控制仿真与分析

利用Matlab/Simulink搭建永磁直驱风电网侧变换器控制模型。仿真参数如下:机侧用受控电压源和串联电阻来模拟,电阻值为10 Ω ,受控电压源开始为1 500 V,在0.2 s时变为2 000 V;直流侧电容值为0.003 F,网侧电感值为0.006 H,电阻值为0.1 Ω ;网侧电源幅值为380 V,频率为50 Hz;电压环PI参数为 $K_p=34$, $K_i=96$;电流环PI参数为 $K_p=100$, $K_i=333$;SVPWM的开关频率为10 kHz;无功功率给定值 Q_g^* 开始为0 var,在0.4 s时变为-20 kvar;仿真时间设为0.6 s。

图6为直流母线电压波形,直流母线电压参考值设定为1 000 V。在电压环的控制下,0.08 s时,直流母线电压稳定在参考值1 000 V,在0.2 s时,机侧受控电压源由1 500 V变为2 000 V,直流母线电压值出现超调,最大幅值变为1 015 V。由于电压环的快速跟踪和稳定性,在0.21 s时直流母线电压稳定在参考值1 000 V。

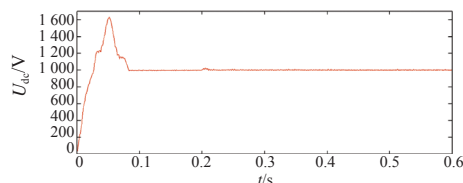


图6 直流侧电压 U_{dc} 波形

图7为网侧a相电流 i_{ag} 和电压 u_{ag} 。在0.2 s时,随着注入电网能量的增大,电网侧a相电流的幅值也从96 A增大到175 A,频率稳定为50 Hz,与电网电压相位一致,说明在0.4 s前注入电网的全部为有功功率;在0.4 s时,注入电网无功功率变为-20 kvar时,a相电流超前电压相位1.37°。交

流侧电流近似正弦, 谐波含量少。

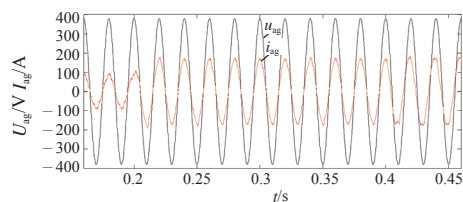


图7 网侧a相电流 i_{ag} 和电压 u_{ag} 波形

图8为 d 轴有功电流 i_{dg} 和 q 轴无功电流 i_{qg} , 图9为注入电网的有功功率 P 和无功功率 Q 。当机侧输入电压为1 500 V时, 注入电网的有功功率为50 kW, 无功功率为0 var, 有功电流为-85 A, 无功电流为0 A, 实现了单位功率因数运行。在0.2 s时, 机侧输入电压增大到2 000 V, 注入电网的有功功率变为100 kW, 无功功率为0 var; 在电流环的调节下, 有功电流变为-170 A, 无功电流为0 A。在0.4 s时, 注入电网的有功功率不变, 无功功率增大到-20 kvar, 增大无功功率能够对电网电压的跌落起到补偿作用; 有功电流不变, 无功电流增大到-40 A, 实现了有功功率和无功功率的解耦控制。

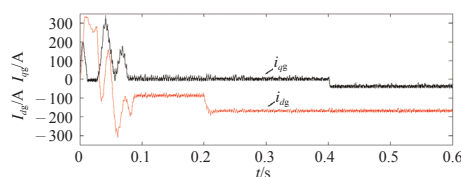


图8 有功电流 i_{dg} 和无功电流 i_{qg} 波形

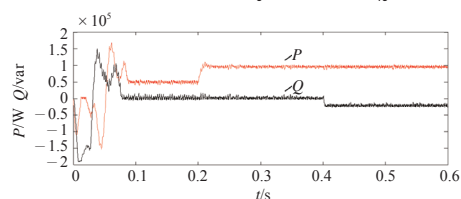


图9 网侧有功功率 P 和无功功率 Q 波形

结束语

首先对网侧逆变器的数学模型进行推导, 然后详细分析了并网控制, 包括电网电压定向控制、有功、无功功率独立控制、前馈解耦控制和电压外环电流内环双闭环控制。最后利用Matlab/Simulink搭建永磁直驱风电网侧变换器控制模型并进行仿真分析, 验证了该并网控制策略能够快速稳定直流侧电压, 实现功率因数可调, 保持电网电压幅值频率稳定、网侧电流接近正弦谐波含量

少的优点, 为永磁直驱风电网侧变换器并网控制提供了可行方案。

参考文献

- [1] 汪令祥. 永磁同步直驱型全功率风机变流器及其控制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [2] 胡书举, 赵栋利, 郭金东, 等. 永磁直驱风电系统PMSG的内模控制策略研究 [J]. 可再生能源, 2009, 27 (3): 21-26.
- [3] Wang xin, Cao Mingfeng, Qiu Li. Control of direct-drive permanent-magnet wind power system grid-connected using back-to-back PWM converter [J]. Intelligent System Design and Engineering Applications, 2013, 10 (9): 478-481.
- [4] Zhang Zhenbin, Christoph Hackl, Wang Fengxiang. Encoderless model predictive control of back-to-back converter direct-drive permanent-magnet synchronous generator wind turbine systems [J]. Power Electronics and Applications, 2013, 11 (9): 1-10.
- [5] Yang Xiyun, Li Lixia, Jiang Feifei. A control strategy combining sliding mode controller with crowbar circuit for low voltage ride through of direct-drive wind power system [J]. Renewable Power Generation Conference, 2013, 10 (4): 1-4.
- [6] 侯圣语, 张豪. 直驱风力发电并网变流器的控制策略研究 [J]. 自动化仪表, 2013, 34 (4): 34-37.
- [7] 金明凤, 赵为, 杨淑英, 等. 风电并网变换器直接功率控制策略 [J]. 电力电子技术, 2011, 45 (8): 66-68.
- [8] 王爱华, 张燕燕, 刘晓敏. 永磁直驱风力发电机网侧变换器的研究与仿真 [J]. 电源学报, 2012, 40 (2): 95-98.
- [9] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [10] 姚兴佳, 赵超群. 永磁直驱风电机组的三电平升压变流技术 [J]. 可再生能源, 2013, 31 (2): 58-62.
- [11] 李建林, 许洪华. 风力发电中的电力电子变流技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(收稿日期: 2014-06-13) EA