

变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略

李立成, 叶 林

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 100083)

摘要: 在分析永磁直驱风电机组变速运行特性的基础上, 在电力系统电磁暂态分析软件平台上建立了永磁直驱风电机组的动态模型, 提出了一种新的永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略。该控制策略能够有效减少风电机组的转矩突变, 在风电机组参与频率调整时对转速进行调节, 并且能够有效增大系统惯性。将所提出的频率-转速协调控制策略与单一的频率控制策略进行仿真对比, 结果表明, 采用频率-转速协调控制策略的永磁直驱风电机组能够有效增大系统惯性, 减小频率波动幅度和转矩突变。

关键词: 风力发电; 永磁直驱风电机组; 频率-转速协调控制; 电磁暂态分析软件

0 引言

由于变转速永磁直驱风电机组省去了容易出故障的齿轮箱传动结构, 运行可靠性好, 发电效率高, 维护工作简单, 所以逐渐成为风电产业发展中的主导机型。永磁直驱风电机组采用全功率双脉宽调制(PWM)变流器, 通过转子磁场定向的矢量控制技术实现最大风能跟踪控制^[1-3]。由于采用了最大风能跟踪控制策略, 使得永磁直驱风电机组的机械功率与系统电磁功率解耦、转速与电网频率解耦。随着风电容量占电网总容量的比重不断提高, 这种解耦效应对系统频率稳定性的影响日益严重。

国内外对变速风电机组的频率响应控制进行了一些研究。文献[4]提出在系统频率变化时通过增加频率控制环节来释放或者吸收转子中的一部分动能, 实现风电机组的频率控制, 但该方法没有考虑风电机组的失速保护问题。文献[5]提出了集频率控制、转速延时恢复, 转速保护系统和与常规机组配合为一体的风电机组频率控制单元, 该单元虽然考虑了转速恢复和转速保护问题, 但是没有针对频率波动较大情况下的转速响应问题作进一步研究。文献[6]提出了额外有功设定值分时控制的新方法, 以转换器容量和失速限制为条件进行切换控制, 却没有解决切换控制时引起的频率二次波动问题。文献

[7]通过仿真将飞轮储能装置引入风力发电系统, 通过飞轮的充/放电控制, 改善传统风电机组的频率控制特性。文献[8-9]针对风电机组离网运行情况, 提出了附加备用频率控制策略, 以改善风电机组的频率响应特性。

本文在考虑永磁直驱风电机组变速运行特点的基础上, 提出了变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略, 并对其有效性进行了验证。

1 频率响应机理与数学模型

电力系统频率是电能质量的基本指标之一, 国家标准 GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》规定: 要保证将系统频率偏差控制在允许范围之内。在大负荷投切时, 如果发电机组出力仍然保持不变, 突增负荷所消耗的能量只能由机组转动部分的动能供给, 而当风电机组动能无法供给突增负荷时, 将会引起系统频率偏差超出允许范围^[10]。

1.1 风电机组的动能

风电机组转动机械中储存的动能为 $E = 0.5J\omega_m^2$, 其中, J 为转动部分的惯性矩; ω_m 为转动角速度。通常将发电机组运行时动能与其额定容量的比值定义为惯性时间常数 $H = J\omega_m^2 / (2S)$, 其中, S 为发电机组额定容量。额定转速下, 常规发电机组的惯性时间常数一般为 $2 \sim 9 \text{ s}$ ^[8], 而风电机组的惯性时间常数约为 6 s 。因此, 通过增加频率控制环节, 可以使永磁直驱风电机组获得与常规发电厂类似的频率惯性响应能力^[11]。

1.2 永磁直驱风电机组的动态模型

EMTP/ATP 是目前国际上广泛使用的电力系统电磁暂态分析程序, 但在其元件库中没有风电机组模型^[12], 本文利用软件中的 MODELS 语言和

收稿日期: 2011-01-22; 修回日期: 2011-04-19。

国家自然科学基金资助项目(51077126); 教育部科学技术研究重点项目(109017); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0543); 北京市自然科学基金资助项目(3113029); 中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(15050203)。

TACS(transient analysis of control system)开发了永磁直驱风电机组的动态等值模型^[13],如图1所示。

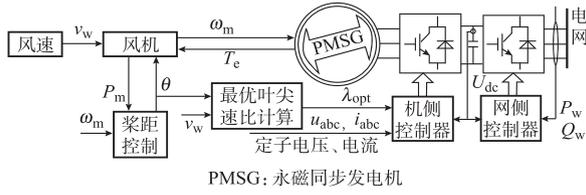


图1 永磁直驱风电机组的动态等值模型

Fig.1 Dynamic model of direct drive permanent magnet synchronous generator based wind power generation system

1.2.1 风机模型

风轮捕获风功率的效率用功率系数 C_p 表征,其计算公式为:

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\beta} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\beta}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - 0.35(\theta^3 + 1)} \quad (2)$$

式中: θ 为叶片桨距角; λ 为叶尖速比, $\lambda = \omega_m R / v_w$; ω_m 为风轮转速; R 为风轮半径; v_w 为风速^[12]。

可以看出,功率系数 C_p 是叶片桨距角 θ 和叶尖速比 λ 的函数。

风机的机械输入转矩 T_m 与风速 v_w 的关系为^[13]:

$$T_m = \frac{0.5\rho\pi R^3 v_w^2 C_p(\theta, \lambda)}{\lambda} \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度;风机功率 $P_m = T_m \omega_m$ ^[14]。

永磁直驱风电机组的传动系统模型为^[15]:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_m - T_e - B_m \omega_m}{J_{eq}} \quad (4)$$

式中: J_{eq} 为机组的惯性矩; B_m 为转动黏滞系数; T_e 为电磁转矩。

1.2.2 永磁同步发电机模型

dq 坐标系下永磁同步发电机的数学模型为^[12]:

$$\begin{cases} u_{sd} = u_{sd}^* + \Delta u_{sd} = -R_s i_{sd} - L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_s L_s i_{sq} \\ u_{sq} = u_{sq}^* + \Delta u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_s L_s i_{sd} + \omega_s \Psi \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_s 和 L_s 分别为发电机的定子电阻和电感; $u_{sd}, u_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ 分别为 d, q 轴定子电压、电流分量; ω_s 为同步电角速度($\omega_s = \omega_m$); Ψ 为转子永磁体磁链。

发电机的电磁转矩 $T_e = p\Psi i_{sd}$ ^[13],其中, p 为发电机极对数。因为发电机的电磁转矩仅与定子电流

q 轴分量有关,所以,在该坐标系下发电机输出有功功率的计算公式亦可写为 $P_s = u_{sq} i_{sq} + u_{sd} i_{sd} = u_{sq} i_{sq}$ ^[15]。

1.2.3 网侧变流器模型

网侧变流器采用电网电压定向的矢量控制技术。假设 dq 坐标系以同步速旋转且 q 轴超前于 d 轴,将电网电压综合矢量定向于 d 轴上,则电网电压在 q 轴上的投影为 0。 dq 坐标系下风电机组送入电网的有功功率和无功功率分别为^[14]:

$$\begin{cases} P_w = e_{gd} i_{gd} + e_{gq} i_{gq} = e_{gd} i_{gd} \\ Q_w = e_{gd} i_{gq} - e_{gq} i_{gd} = e_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $e_{gd}, e_{gq}, i_{gd}, i_{gq}$ 分别为电网电压、电流的 d, q 轴分量。调节电流矢量在 d, q 轴的分量就可以独立控制变流器的有功功率和无功功率。

网侧变流器在 dq 坐标系下的电压表达式为^[15]:

$$\begin{cases} u_{gd} = u_{gd}^* + \Delta u_{gd} = -R_g i_{gd} - L_g \frac{di_{gd}}{dt} + \omega_g L_g i_{gq} + e_{gd} \\ u_{gq} = u_{gq}^* + \Delta u_{gq} = -R_g i_{gq} - L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_g i_{gd} \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_g 和 L_g 分别为网侧变流器进线电抗器的电阻和电感; u_{gd} 和 u_{gq} 分别为网侧变流器 d, q 轴电压分量; ω_g 为电网角频率。

2 永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略设计

为保证永磁直驱风电机组的运行效率,在不对系统频率变化做出响应时,永磁直驱风电机组采用最优叶尖速比跟踪控制,实现最大风能追踪。当系统频率出现较大偏差时,风电机组频率控制环节开始动作,将机组动能转化为电能供给突增负荷,使频率偏差保持在允许范围内。

2.1 改进的永磁直驱风电机组最大风能追踪控制策略

根据上述控制目标,本文对永磁直驱风电机组最大风能追踪控制策略加以改进,使改进后的永磁直驱风电机组能够根据系统的频率状况,自动调整运行模式,同时满足追踪最大风能和系统频率进行支撑的双重要求。改进后的永磁直驱风电机组控制策略框图如图2所示。

图2中:虚线框①内的部分用于计算风轮捕获的风功率,由式(3)~式(5)得出;虚线框②内的部分为机侧交叉耦合电压补偿项 Δu_{sd} 和 Δu_{sq} ,由式(5)得出;虚线框③内的部分为网侧交叉耦合电压补偿

项 Δu_{gd} 和 Δu_{gq} , 由式(7)得出。图2中用到了KP变换实现直角坐标向极坐标的变换以获得电角频率, KP变换的原理如虚线框⑥内的部分所示。

当永磁直驱风电机组对系统频率变化做出响应时, 发电机输出的有功功率与网侧变流器输出的有功功率变化趋势相同, 此时, 如果仍然采用发电机输出的有功功率作为前馈量 P_s/e_{gd} 输入网侧变流器, 将形成正反馈, 导致系统不稳定。

针对该问题, 本文采用风轮捕获的风功率作为前馈量 P_m/e_{gd} , 与直流电压调节环构成内环 d 轴电流给定, 在风速变化时, 可以实现网侧变流器 d 轴电流的迅速调节, 及时将发电机输出的有功功率送

入电网; 在参与调频时, 可以将风轮捕获的风功率信息及时反映到网侧, 辅助保护风电机组转速。

为便于实现频率控制, 永磁直驱风电机组的机侧变流器和网侧变流器均采用功率前馈控制。图2中虚线框⑤内的部分为改进后的永磁直驱风电机组最大风能追踪控制策略。根据 $P_m = T_m \omega_m$ 和 $P_s = u_{sq} i_{sq}$, 推出 $P_w = P_s = e_{gd} i_{gd} = T_e \omega_{meas}$ 。其中, T_e 为发电机电磁转矩; ω_{meas} 为发电机转速的测量值。由此可知, 改进后的控制策略采用定子侧有功功率输出 P_s 跟踪定子侧有功功率参考值 P_{sref} , 而传统的最优叶尖速比跟踪控制策略采用发电机转速的测量值 ω_{meas} 跟踪最优转速 ω_{opt} , 两者效果相同。

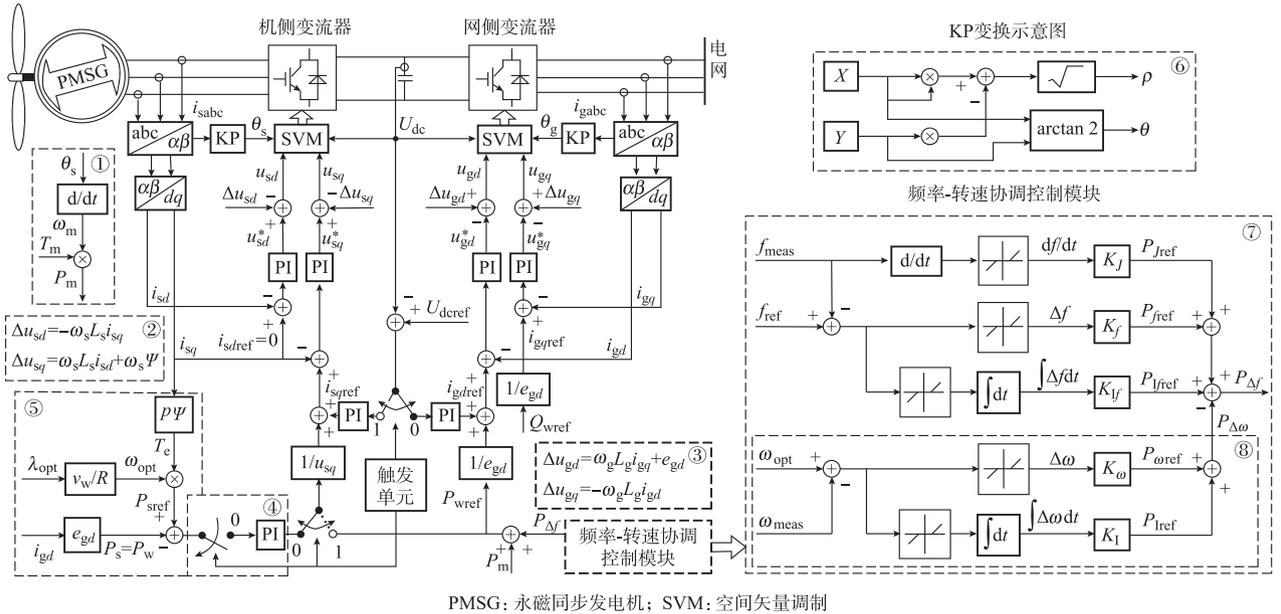


图2 永磁直驱风电机组频率-转速协调控制框图

Fig. 2 Frequency-speed coordination control diagram of direct drive permanent magnet synchronous generator based wind power generation system

图2中的触发单元用于控制永磁直驱风电机组在最大风能追踪运行模式与频率控制运行模式之间的切换。风电机组工作于最大风能追踪运行模式时, 触点位于位置0。此时, 机侧变流器发出跟踪最优功率指令, 保持最优叶尖速比, 实现最大风能追踪; 网侧变流器通过直流电压调节环, 动态调节有功电流, 保持直流母线电压稳定, 并根据风速变化, 快速调整送入电网的有功功率。当频率控制模块检测到系统频率偏差超出设定值时, 触发器动作, 触点切换到位置1。频率控制模块输出的频率偏差功率指令 $P_{\Delta f}$ 和风轮捕获的风功率指令 P_m 一同作为前馈量, 输入到机侧变流器和网侧变流器, 直流电压调节环切换到机侧变流器, 同时, 虚线框④内的比例-积分(PI)控制器清零, 开关断开。此时, 网侧变流器迅

速改变向电网送出的有功功率, 抑制频率变化的速率, 使常规发电厂获得足够的频率响应时间; 机侧变流器根据功率前馈指令增加发电机的电磁功率, 并且通过直流电压调节环控制直流母线电压稳定。

采用传统频率控制策略时^[5-6], 触发器在风电机组转速低于设定值或频率恢复到允许范围内时切换至位置0, 但是由于作为输入的风能无法调节, 在频率恢复之前, 因为风电机组的动能损失过多而导致转速过低, 可能引起频率的二次波动。为避免频率二次波动给系统带来不利影响, 将转速控制引入频率控制环, 将频率响应阶段与转速恢复阶段相结合作为控制触发器动作条件, 设定当定子侧有功功率参考值 P_{sref} 与定子侧有功功率输出 P_s 的差值小于设定值时, 控制触发器动作, 完成控制切换操作。

2.2 频率-转速协调控制策略

针对传统频率控制策略的不足,本文提出了频率-转速协调控制策略,不仅可以抑制系统的频率波动,还可以根据风电机组电磁功率的变化率调节转速控制参数,使风电机组获得较好的频率响应能力,避免系统频率的二次波动,以获得较好的转速恢复特性。

由于风轮捕获的风功率作为前馈量 P_m/e_{gd} , 受到影响而偏离最优转速,网侧变流器的有功前馈量随之下降。为不影响采用单一频率控制时的控制效果,在频率控制环内增加积分补偿环节(如图2中虚线框⑦所示),输出频率有功前馈补偿量 P_{1fref} 用于平衡转速偏离后捕获风功率的减少量。

图2中虚线框⑧内的部分为所提出的转速协调控制环,当风电机组的实际转速 ω_{meas} 偏离最优转速 ω_{opt} 后,转速控制环输出转速偏差功率指令 $P_{\Delta\omega}$, 作为负反馈给入频率控制环,与系统惯性模拟指令 P_{Jref} 、频率偏移幅度抑制指令 P_{fref} 和频率有功前馈补偿量 P_{1fref} 一起合成后,作为频率偏差功率指令 $P_{\Delta f}$, 将其作为前馈量给入网侧变流器。转速控制环中转速偏差系数 K_{ω} 在满足频率控制要求的前提下尽量取大,以降低转速偏离程度;积分系数 K_I 根据系统容量和常规发电厂电磁功率的变化率整定。

3 仿真分析

本文参照 XD102-2500 永磁直驱风电机组的参数和运行特性,在 EMTP/ATP 平台上搭建了永磁直驱风电机组的动态等值模型。仿真系统接线如图3所示。

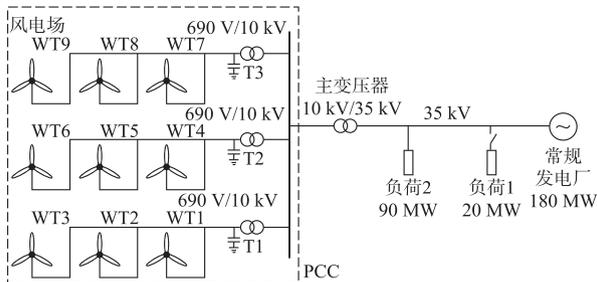


图3 仿真系统接线示意图

Fig.3 Single line diagram of simulated wind power system

图3中,单台永磁同步发电机的额定功率为2.5 MW,负荷1和2分别为90 MW和20 MW的投入负荷,常规发电厂的容量为180 MW。风电场由9台2.5 MW永磁直驱风电机组和机端变压器T1,T2,T3组成,系统仿真时间长度设为35 s。

3.1 频率响应过程分析

本文分别研究了永磁直驱风电机组在无频率控制环、采用单一频率控制环和采用频率-转速协调控制环3种情况下的频率响应过程。为模拟频率响应过程,在仿真开始时,图3中负荷1(20 MW)处于断开状态,在 $t=5$ s时,开关合上,模拟负荷突然增大的情况。永磁直驱风电机组在3种情况下的系统频率变化过程如图4所示。

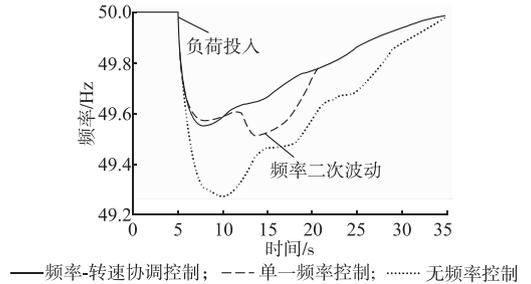


图4 风电场频率响应曲线

Fig.4 Frequency response curve of wind farm

在无频率控制环情况下,负荷1投入后,系统频率迅速下降。由于风电机组的惯性与电网相解耦,导致系统惯性较小,频率下降幅度很大,超出了频率偏差的允许范围。从图4中采用单一频率控制环情况下的频率响应过程可以看出,系统频率的下降幅度明显减小,但是,由于风电机组的动能损失过多而导致机组转速过低,频率控制环被切除时,系统频率又出现了二次下降(即频率二次波动)。从图4中采用频率-转速协调控制环情况下的频率响应过程可以看出,采用频率-转速协调控制环不仅使得负荷投入后的频率下降幅度减小至国标允许的范围内,而且避免了系统频率出现二次波动,并且使频率恢复过程得到改善。

3.2 转速响应过程分析

永磁直驱风电机组在3种情况下的系统转速变化过程如图5所示。在无频率控制环情况下,风电机组运行在最大风能追踪控制模式,机组对系统频率变化无响应,其转速仅根据风速的变化进行调整,保持最优叶尖速比,以追踪最大风能。分析图5中风电场在单一频率控制情况下的等效转速响应曲线可知:风电机组转动部分储存的动能有限,并且没有可控的能量来源,如果调频过度,则只能因为转速过低而强行切除频率控制环节,造成系统频率的二次波动。分析图5中采用频率-转速协调控制环的风电场等效转速响应曲线可知:该曲线的转速变化较为平缓,在对系统频率起到支撑作用的同时,避免了系统频率出现二次波动,改善了频率的恢复特性。

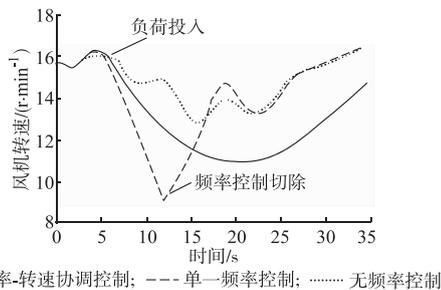


图5 风电场转速响应曲线

Fig. 5 Rotational speed response curve of wind farm

3.3 有功功率输出特性分析

图6(a)为无频率控制环情况下风电场有功功率输出特性。可以看出,风电场的有功功率输出与风速的变化密切相关,并且略微滞后于风速的变化,这是由风电机组的惯性决定的。图6(b)为采用单一频率控制环情况下风电场有功功率输出特性。可以看出,风电机组由于过度调频而导致转速过低,在 $t=12\text{ s}$ 时,频率控制环被强行切除,风电场的有功功率输出减少了10 MW,因此造成了系统频率的二次波动(如图4中单一频率控制曲线所示)。图6(c)为采用频率-转速协调控制环情况下风电场有功功率输出特性。可以看出,风电场的有功功率输出变化较为平缓,避免了系统频率出现二次波动。

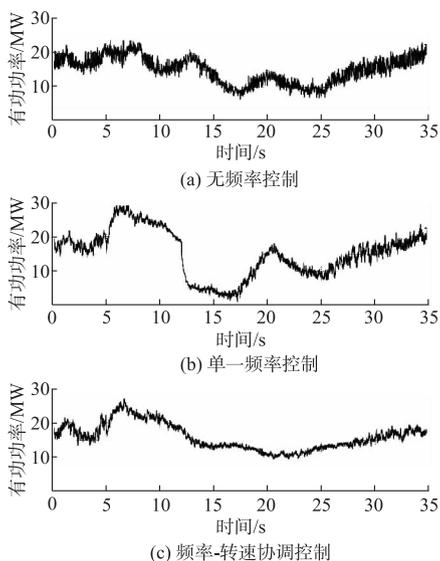


图6 风电场有功功率输出

Fig. 6 Active output power of wind farm

3.4 电磁转矩特性分析

风电场等效电磁转矩如图7所示。从图7(a)可以看出:风电场等效电磁转矩的变化趋势与风速曲线的变化趋势相一致,表明风电机组在无频率控制环的情况下,通过调整发电机的电磁转矩实现变

速运行,提高风能的利用率。从图7(b)可以看出:在大负荷投入后,风电场的等效电磁转矩迅速增大,导致风电机组的转速迅速下降(如图5中单一频率控制曲线所示);因风电机组转速过低而切除频率控制时,风电场的等效电磁转矩出现突变,减少了70%,这将会给传动轴等机械部件带来很大冲击,缩短风电机组的使用寿命。采用频率-转速协调控制后,风电场的等效电磁转矩变化过程如图7(c)所示,可以看出:风电场的等效电磁转矩变化较为平缓,有效减轻了风电机组机械系统的应力,有助于减缓机械疲劳。

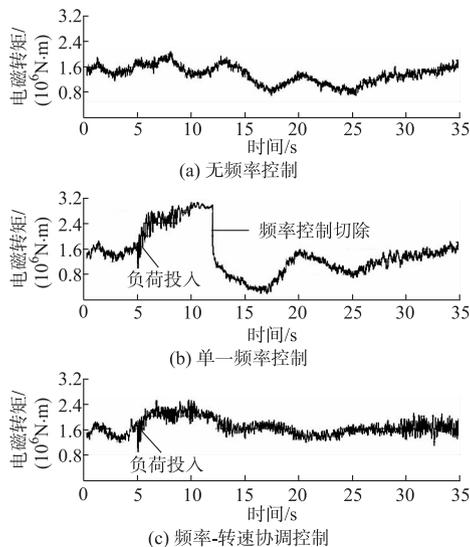


图7 风电场等效电磁转矩

Fig. 7 Equivalent electromagnetic torque of wind farm

4 结语

本文在传统最优叶尖速比跟踪控制的基础上,提出了变风速下永磁直驱风电机组的频率-转速协调控制策略。研究表明,在频率波动较大时,该控制策略可以消除因风电机组动能损失过多而导致的系统频率二次波动,从而可以有效减轻传动轴中的应力疲劳。

由于频率控制采用的是传统的比例-积分-微分(PID)控制,控制效果受控制器参数的影响非常大,在实际工程中,控制器参数多依靠经验进行匹配,因此,进一步的研究应该针对永磁直驱风电机组的频率模糊控制响应。此外,还应该考虑通过桨距控制加快转速的恢复速度。

参考文献

- [1] 姚骏,廖勇,庄凯. 永磁直驱风电机组的双PWM变换器协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):88-92.

- YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. Coordinated control strategy of back-to-back PWM converter for permanent magnet direct-driven wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 88-92.
- [2] 李建林,高志刚,胡书举,等. 并联背靠背 PWM 变流器在直驱型风力发电系统的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(5):59-62. LI Jianlin, GAO Zhigang, HU Shuju, et al. Application of parallel back-to-back PWM converter on the direct-drive wind power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 59-62.
- [3] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.
- [4] LALOR C, MULLANE A, O' MALLEY M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [5] JENKINS E J N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 800-802.
- [6] ANAYA-LARA O, HUGHES F M, JENKINS N, et al. Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency-regulation[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 164-170.
- [7] 孙春顺,王耀南,李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):111-116. SUN Chunshun, WANG Yaonan, LI Xinran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 111-116.
- [8] MORREN J, de HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [9] MULLANE A, O' MALLEY M. The inertial response of induction-machine-based wind turbines [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1496-1503.
- [10] 林海雪. 电力系统频率偏差标准[J]. 大众用电,2005(11):37-39. LIN Haixue. Standard of power system frequency offset[J]. Popular Utilization of Electricity, 2005(11): 37-39.
- [11] MORREN J, PIERIK J, de HAAN S W H. Inertial response of variable speed wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(11): 980-987.
- [12] KRCUM M, GUDELJ A, JURIC Z. Dynamic simulation of permanent magnet synchronous machine[C]// Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2004), May 12-15, 2004, Dubrovnik, Croatia: 1117-1120.
- [13] 宁世国,叶林. 户用风力发电系统离网运行控制策略[J]. 农业工程学报,2010,26(5):232-239. NING Shiguo, YE Lin. Control strategy of off-grid household wind power generation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 232-239.
- [14] 李鹏程,叶林. 基于 EMTP/ATP 的双馈式风力发电系统的模型与实现[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):93-97. LI Pengcheng, YE Lin. EMTP/ATP based modelling of DFIG wind turbines with vector control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 93-97.
- [15] 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. LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 62-67.

李立成 (1985—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制、新能源发电技术。

叶林 (1968—),男,通信作者,教授,博士生导师,德国洪堡学者,主要研究方向:电力系统自动化、新能源发电与超导电力应用。E-mail:YL@cau.edu.cn

Coordinated Control of Frequency and Rotational Speed for Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine at Variable Wind Speeds

LI Licheng, YE Lin

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A dynamic model of direct drive permanent magnet synchronous generator (D-PMSG) wind turbine is developed with ElectroMagnetic Transient Program/Alternative Transient Program (EMTP/ATP) software, on the basis of operational characteristics of D-PMSG with variable speeds. A novel coordinated control strategy of frequency and rotational speed is proposed to prevent second frequency variation caused by activation of rotational speed protection. Simulation results show that the proposed control strategy can capture maximum wind power in normal operation, and also minimize frequency variation following a sudden change of large load, which avoids second frequency variation and torque sudden change.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077126), the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 109017), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-08-0543), Beijing Municipal Natural Science Foundation (No. 3113029).

Key words: wind power; direct drive permanent magnet synchronous generator (D-PMSG); coordinated control of frequency and rotational speed; EMTP/ATP