

DOI: 10.7667/PSPC152181

基于联合仿真的风电机组低电压穿越传动链扭振抑制研究

胡文平, 周文, 王磊, 李晓军

(国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 针对双馈风电机组传动链电网故障过程中可能存在的扭振问题, 采用弹簧阻尼质量建模方法, 建立了能够反映柔性特性的传动链模型, 得出了其自然振荡频率与阻尼系统解析表达式, 揭示了柔性传动链的欠阻尼系统本质。通过故障期间发电机电磁转矩特性分析, 说明了通过发电机电磁转矩突变量与高频脉动控制减弱传动链机械扭振的不可行性。在此基础上, 提出了电网故障期间传动链的虚拟变阻尼控制策略, 通过发电机附加转矩控制等效增大传动链阻尼, 抑制了电网故障期间传动链的扭振。通过风电机组 Bladed+Matlab 联合仿真模型仿真分析, 证明了理论分析与虚拟变阻尼扭振抑制策略的有效性。

关键词: 电网故障; 传动链扭振; 虚拟变阻尼; 扭振抑制; 联合仿真

Study on suppression strategy for wind turbine drive train torsional vibration under grid fault based on co-simulation

HU Wenping, ZHOU Wen, WANG Lei, LI Xiaojun

(Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: As the drive train torsional vibration may be stimulated by the huge change of electromagnetic torque caused by grid fault, the flexible drive train is modeled using spring-damping-mass modeling method firstly, the analytical expression of the natural oscillation frequency and damping coefficient are obtained, and the flexible drive train is typical under damped system is revealed. Then the ineffectiveness of the change of generator torque and high frequency torque pulse control is illuminated by analyzing characteristics of the generator electromagnetic torque during grid fault. On this basis, the torsional vibration suppression strategy of virtual variable damping is proposed, which is worked by implementing additional electromagnetic torque to increase in the drive train damping equivalently during the grid fault. The Bladed and Matlab co-simulation results strongly support the theoretical analysis and verify the proposed control strategy.

Key words: grid fault; drive train torsion vibrating; virtual variable damping; torsional vibration suppression; co-simulation

0 引言

为保障大规模风电并网运行及自身安全, 需建立精确的风电机组机械-电气暂态模型, 研究风电机组的机电耦合动态运行特性, 特别是电网故障情况下风电机组的机电动态响应特性。其中双馈风电机组低电压穿越一直以来是学术界研究的重点和难点, 大量风电机组低电压穿越特性的文章得以发表^[1-11]。文献[1]建立了双馈风电机组动态模型, 研究了电网电压跌落过程中双馈机组的电磁暂态过程; 文献[2]基于双馈风电机组定转子电压方程, 分别在严重和非严重跌落情况下, 定性分析双馈风电机组定子电流动态变化过程。文献[3]利用双馈风电

机组动态模型, 研究了双馈风电机组转子Crowbar保护电路的参数及保护动作时间对机组暂态特性的影响。然而目前关于风电机组故障穿越的研究大多采用传动链集中质量块模型, 未考虑传动链的柔性特性对机组动态性能的影响; 另外, 主要关注风电机组故障穿越过程的暂态过电压、瞬态过流和相应的控制与保护问题, 以使其输出电流、功率等符合并网导则的要求。

然而风电机组传动链是典型的欠阻尼系统, 电网电压跌落情况下发电机电磁转矩的突变, 必将造成传动链两端转矩不平衡, 导致长时间的扭振发生, 对风电机组传动链极为不利, 可能损毁传动轴与齿轮箱, 甚至对风机塔架的安全产生威胁, 关系到风

电机组的运行稳定安全、载荷疲劳与使用寿命。针对双馈风电机组传动链扭振抑制已有文献进行过研究^[12-16], 文献[12]建立了双馈风电机组柔性传动链模型, 通过仿真与试验证明了电网故障的确会触发传动链的扭矩振荡, 但未涉及扭振抑制策略研究; 文献[13]研究轴系关键参数对扭振的影响, 从削弱故障及恢复时刻转矩过冲和增加阻尼入手, 提出了附加电磁转矩实现的传动轴阻尼虚拟配置方法, 抑制了故障情况下的轴系扭振; 文献[14]提出了一种削弱定速机组故障期间扭振的方法, 但是需要借助于辅助的STATCOM装置。目前, 缺乏电网故障情况下传动链机电耦合特性及扭振抑制的研究, 电网故障期间风电机组传动链扭振及抑制研究的报道较少, 未得到应有的重视。

本文从传动链柔性建模入手, 基于电网故障情况下传动链机电耦合及扭振特性分析, 提出了电网故障期间传动链的虚拟变阻尼控制策略, 通过发电机附加转矩控制等效增大传动链阻尼, 抑制了电网故障期间传动链的扭振, 并通过风电机组Bladed+Matlab联合仿真模型进行了仿真验证, 为电网故障情况下双馈风电机组的传动链扭振抑制提供了一条可行的途径。

1 传动链柔性建模

双馈风电机组主要由风力机、传动轴、齿轮箱、双馈发电机、双馈变流器组成, 如图1所示。双馈风电机组发电机定子直接与电网相连, 发电机转子通过背靠背变流器与电网相连。转子侧变流器可控制双馈电机的转矩、转速和并网功率因数, 网侧变流器则主要维持直流侧电压稳定。

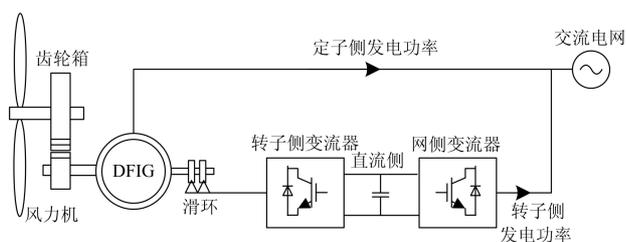


图1 双馈风电机组结构示意图

Fig. 1 Structure chart of double-fed induction generation wind turbine

双馈风电机组的传动链主要包括: 风轮、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机, 传动链模型概括起来主要包括集中质量块、两质量块、三质量块、六质量块和多质量块模型^[12]。集中质量块模型完全忽略传动链的旋转阻尼特性和刚度等柔性特性, 无法

反应电网故障情况下的扭矩振动情况。六质量块传动链模型能够很好的反映传动链的动态响应特性, 但其建模复杂、计算速度慢, 难以应用于风电机组机电暂态建模、分析与控制。而双馈风电机组传动链可自然划分为三个质量块(风轮、齿轮箱和发电机)和两个柔性轴(高速轴和低速轴), 考虑到低速轴的刚性远大于高速轴, 齿轮的转动惯量远小于风轮转动惯量, 可通过合并质量块将三质量块简化为两质量块模型, 等效计算可依据平行轴定理进行。两质量块传动链模型能够较好地反映电网故障情况下传动链的扭矩动态响应特性^[12], 为简化分析, 考虑齿轮箱变比, 不计传动链的能量损失, 经转动惯量的计算与折算, 将低速轴的转动惯量折算到风机侧, 高速轴的转动惯量折算到发电机侧, 可得包括齿轮箱低高速轴阻尼特性、刚性及其风机、齿轮箱、发电机转动惯量的两质量块动态模型如图2所示, 此时系统的可用方程式(1)加以描述。

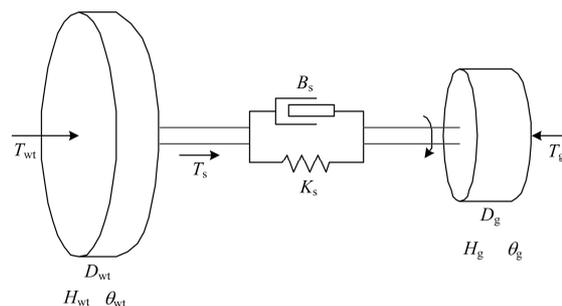


图2 传动链柔性两质量块模型

Fig. 2 Flexible two-mass drive train mode

图中: H_{wt} 、 H_g 分别为风轮和发电机等效惯量时间常数; T_{wt} 、 T_s 、 T_g 分别为风轮气动转矩、传动轴扭矩和发电机电磁转矩; θ_{wt} 、 θ_g 分别为风轮和发电机电磁转矩; B_s 、 K_s 分别为传动轴的阻尼和刚度系数; D_{wt} 、 D_g 分别为风轮自阻尼和发电机自阻尼, 各物理量均折算到低速轴侧并标么化, 可得到轴系的状态方程。

$$\begin{cases} 2H_{wt}\ddot{\theta}_{wt} + D_{wt}\dot{\theta}_{wt} = T_{wt} - T_s \\ 2H_g\ddot{\theta}_g + D_g\dot{\theta}_g = T_s - T_g \\ T_s = B_s\dot{\theta} + K_s\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\theta = \theta_{wt} - \theta_g$ 为传动轴的扭转角度。

由于 D_{wt} 、 D_g 通常很小, 忽略这两项的影响, 可得两质量传动链的欧拉方程。

$$\ddot{\theta} + B_s \left(\frac{1}{2H_{wt}} + \frac{1}{2H_g} \right) \dot{\theta} + K_s \left(\frac{1}{2H_{wt}} + \frac{1}{2H_g} \right) \theta = 0 \quad (2)$$

则传动链的自然振荡频率:

$$\omega_n = \sqrt{K_s \left(\frac{1}{2H_{wt}} + \frac{1}{2H_g} \right)} \quad (3)$$

传动链的阻尼系数:

$$\zeta = \frac{B_s}{2\sqrt{K_s}} \sqrt{\frac{1}{2H_{wt}} + \frac{1}{2H_g}} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知:传动链各质量块的转动惯量、各质量块的自阻尼、传动轴的刚度和阻尼等关键参数直接影响传动链的动态响应特性。本文所采用的传动链参数为 $H_{wt}=3.0\text{ s}$, $H_g=0.6\text{ s}$, $B_s=0.12$, $K_s=100$ 。计算得到 $\omega_n=10\text{ rad/s}$ ($f_n=1.59\text{ Hz}$), $\zeta=0.006$, 由于阻尼系数远小于1, 系统为典型的欠阻尼系统。电网电压故障情况下, 由于发电机组电磁转矩的突变, 易激发传动链扭矩振荡。

2 电网故障下传动链扭矩特性

电网故障情况下风电机组传动链扭振的主要激发源是发电机的电磁转矩, 因此有必要充分认识电网故障情况下发电机电磁转矩特性。目前较为流行的双馈风电机组低电压穿越方案是转子侧Crowbar电阻保护, 该方案在发电机转子电流超出一定阈值时Crowbar电阻投入, 将转子侧变流器短接, 同时转子侧变流器锁闭, 避免转子侧变流器出现过流损伤, 发电机作为笼型异步电机运行, 此时发电机扭矩由风电机组运行工况决定。图3所示是发生单相接地故障的发电机组电磁转矩波形, 可以看出电网电压跌落情况下发电机电磁转矩脉动的频率主要为50 Hz和100 Hz分量。

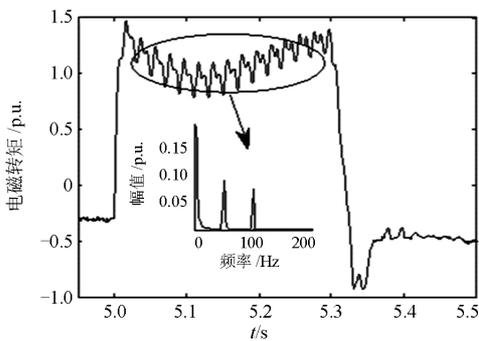


图3 电网故障的转矩响应

Fig. 3 Torque response under grid fault

为了研究发电机电磁转矩暂态响应对扭振振荡的影响, 需建立传动轴扭振特征量与扭振激励源之间的函数关系, 定义传动轴扭转角速度 $\varepsilon = \omega_{wt} - \omega_g$ 为传动链扭振的特征量, 可得从扭振特征量 ε 到扭振激励源 T_g 的传递函数:

$$\frac{\varepsilon(s)}{T_g(s)} = \frac{s}{2H_g s^2 + \frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} B_s s + \frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} K_s} \quad (5)$$

对式(5)进行频域分析, 可得其幅频响应的伯德图如图4所示, 谐振峰对应于轴系自然振荡频率为1.59Hz, 从bode图可以看出50Hz以上频段的幅频响应幅值很小, 相对大时间常数的机械扭振问题对转矩高频脉动的感受并不敏感, 又由于故障引发的磁链直流分量衰减很快, 电磁暂态响应在一到两个周波内基本趋于稳定, 因此可以推断故障发生和恢复短时间内的转矩暂态响应以及故障期间转矩的高频脉动对扭振影响较小。

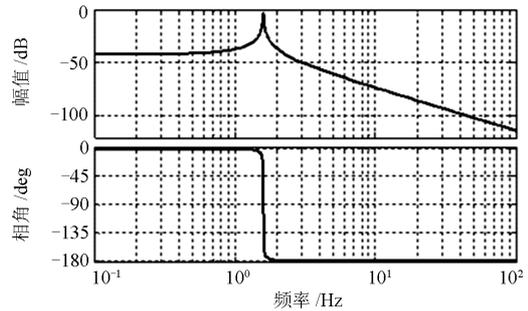


图4 传动链幅频特性 bode 图

Fig. 4 Bode chart for drive train system

由于故障期间电磁转矩的稳态分量相比故障前会发生突变, 导致传动链从一个稳态向另一个稳态过渡, 过渡过程通常伴随扭矩振荡的发生。显然, 减小发电机电磁转矩变化幅度或增大传动系统阻尼系数是减缓电网故障情况下传动链扭矩振荡的可行方案。在电网电压跌落情况下, 若转子侧变流器闭锁, 发电机电磁转矩与crowbar电阻阻值及发电机转差率有关, 由于crowbar电阻阻值范围受转子侧变流器通流能力与直流侧电压等多重因素决定, 其阻值调整范围有限, 因此crowbar电阻的阻值对电网电压跌落过程中发电机扭矩变化影响较小; 而即使转子侧变流器正常运行, 风电机组通常均采用无功优先的控制策略, 有功域度有限, 减小发电机的电磁转矩突变幅度以减小传动链扭矩振荡基本不可行。相比而言, 增大传动链阻尼是减小电网故障期间传动链扭矩振荡的简单可行的方法。

3 传动链虚拟变阻尼控制

如前所述, 调整传动链阻尼对于传动链扭振振荡的抑制具有积极的意义。对于新设计的风电机组, 可通过优化设计传动链阻尼参数达到减小故障期间

传动链扭矩振荡的效果;而对于已运行的风电机组,则可通过发电机转矩控制对传动链进行虚拟变阻尼控制,抑制电网电压故障情况下传动链的扭矩振荡。传动链虚拟变阻尼控制的核心思想是通过发电机转矩控制实现传动链阻尼系数可控变化,其是建立在发电机转矩可控且能够快速响应的基础上,而相对与传动链机械扭振,发电机电磁转矩响应几乎无时滞。

假设发电机转矩 T_g 能够按下式进行控制。

$$T_g = T_{opt} - k \times \varepsilon \quad (6)$$

式中: T_{opt} 是控制风力机实现最优风能捕获的最优转矩; k 为附加转矩系数; $-k \times \varepsilon$ 是附加的转矩项; 则从 ε 到 T_g 的传递函数变为

$$\frac{\varepsilon(s)}{T_g(s)} = \frac{s}{2H_g s^2 + \frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} B_{eq} s + \frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} K_s} \quad (7)$$

其中, $B_{eq} = B_s + \frac{H_{wt}}{H_{wt} + H_g} k$ 。

由式(7)可以看出,在常规控制中电磁转矩给定值的基础上附加 $-k \times \varepsilon$ 项,就可为传动链提供数值为 b_v 的额外阻尼。反之,如果需要提供额外的数值为 b_v 的虚拟阻尼,需要的附加转矩:

$$\Delta T_g = -\frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} b_v \times \varepsilon \quad (8)$$

如式(8)所示,附加转矩项需借助于扭转角速度 ε 来确定,而 ε 是一个很小的量,受限于测量精度无法准确获取,可以通过以下方法进行间接获取。

传动轴扭矩对于两端的质量块来说分别是动力转矩和阻力转矩,两个质量块的波动分量具有反相性质,且二者的波动幅值成比例关系^[16],用 $\hat{\omega}_g$ 、 $\hat{\omega}_{wt}$ 分别表示发电机和风力机转速的扭振频率波动分量,则

$$\frac{\hat{\omega}_g}{\hat{\omega}_{wt}} = -\frac{H_{wt}}{H_g} \quad (9)$$

传动链两端的质量块转速的稳态分量可认为是近似相等的,因此可得 ε 的解析表达式

$$\varepsilon = \omega'_{wt} - \omega'_g = -\frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} \hat{\omega}_g \quad (10)$$

其中 $\hat{\omega}_g$ 可以通过发电机转速的带通滤波获得,结合式(9)、式(10),有

$$\Delta T_g = \left(\frac{H_{wt} + H_g}{H_{wt}} \right)^2 b_v \times \hat{\omega}_g \quad (11)$$

由于实际风电机组通常以定子有功功率作为控制输入,由于 $P_s = T_g \times \omega_s$, 则有

$$\Delta P_s^* = \Delta T_g \omega_s = \frac{2\pi f}{P_n} \Delta T_g \quad (12)$$

式中: ω_s 为同步转速; f 为电网频率; P_n 为极对数。

为由于受机组容量限制,应对附加转矩进行适当限幅。基于以上分析,传动轴阻尼虚拟配置的实现框图如图 5 所示。

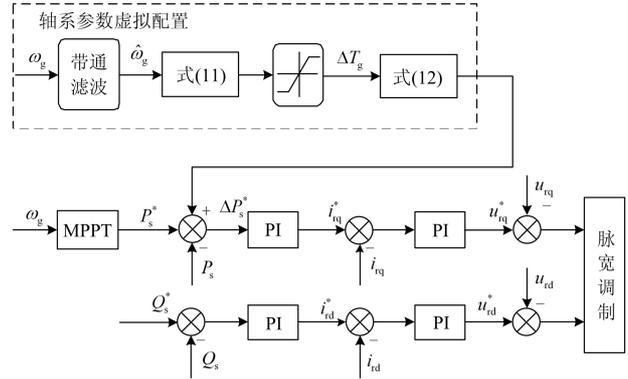


图 5 传动轴虚拟阻尼控制框图

Fig. 5 Structure chart of virtual damping control for double-fed induction generation wind turbine

另外,额外的附加阻尼将影响传动链的传动效率,为不影响正常情况下风电机组的正常发电,可以引入风电机组并网点基波正序电压 U_1 作为判据,当 $U_1 < 0.9$ p.u.时,虚拟阻尼投入运行,而当 $U_1 \geq 0.9$ p.u.时,虚拟阻尼退出运行。

4 仿真结果与分析

为了验证电网故障情况下风电机组传动链扭振特性及虚拟变阻尼扭振抑制策略的有效性与准确性。搭建了能够精确反映电网故障情况下双馈风电机组传动链机械特性和发电机电磁暂态特性的 Bladed+Matlab 联合仿真系统,在 GH Bladed 中搭建了能够反映风电机组传动链柔性特性及扭振的风电机组机械部分的仿真模型,在 Matlab/Simulink 中建立能够反映双馈变流器、发电机及电网电气部分的电磁暂态仿真模型,Bladed 模型与 Simulink 模型之间使用 Socket 通讯形式进行参数传递和时间同步。联合仿真系统结构图如图 6 所示。

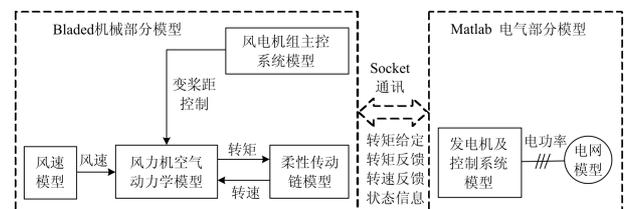


图 6 Bladed+Matlab联合仿真系统结构框图

Fig. 6 Diagram of Bladed and Matlab co-simulation

基于 Bladed+Matlab 联合仿真模型, 进行电网故障情况下传动链机电耦合特性及扭振抑制的研究。为方便比较分析, 首先双馈发电机不采取虚拟阻尼控制, 待整个系统进入稳态后, 在 72s 时模拟触发电网单相短路故障, 电压跌落到 20% 额定电压。风电机组传动链电网故障响应特性如图 7 所示, 图 7(a)和图 7(b)分别为电网故障期间发电机转速和传动轴转矩动态响应曲线, 可以看出: 电网故障激发了发电机转速振荡和传动轴扭振, 传动链自身阻尼使得扭振衰减, 约 20 s 后扭矩趋于稳定, 扭振衰减速度较慢。

接着双馈发电机采取虚拟阻尼控制, 且虚拟阻尼值设定为传动链阻尼的 2 倍, 重复未加阻尼控制时的电网故障工况, 此时风电机组传动链电网故障响应特性如图 8 所示, 图 8(a)和图 8(b)分别为电网故障期间发电机转速和传动轴转矩动态响应曲线, 可以看出: 采用虚拟阻尼控制后, 电网故障虽激发了发电机转速振荡和传动轴扭振, 但由于传动链阻尼的增大, 使得传动轴扭振衰减加快, 约 10s 扭矩即趋于稳定, 扭振衰减速度显著加快, 传动链扭振得到有效抑制, 仿真结果证明了理论分析与虚拟变阻尼扭振抑制策略的有效性。

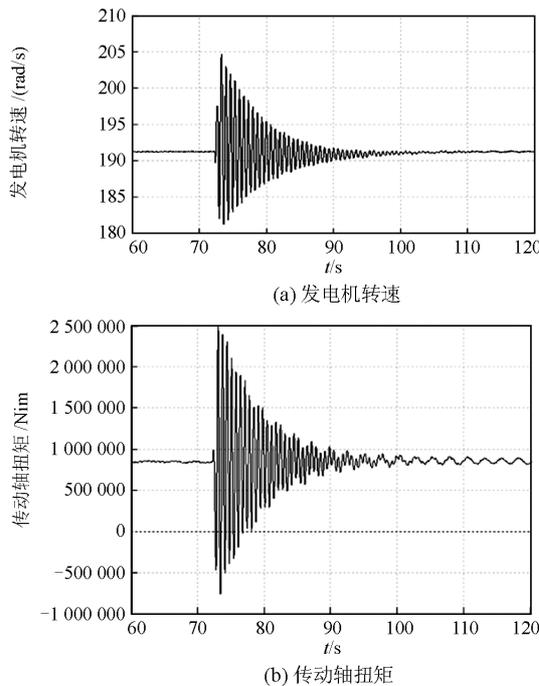


图 7 未加虚拟阻尼时传动链电网故障仿真波形
Fig. 7 Simulation waveforms of characteristics of drive train during grid fault without virtual damping control

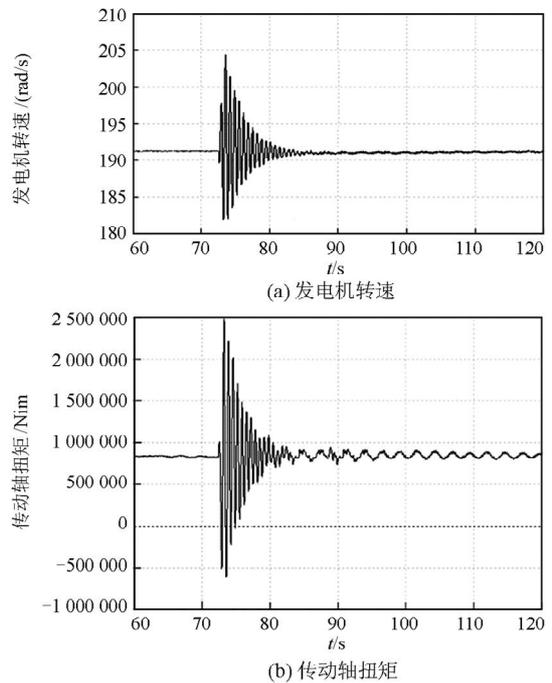


图 8 施加虚拟阻尼时传动链电网故障特性

Fig. 8 Simulation waveforms of characteristics of drive train during grid fault with virtual damping control

5 结论

(1) 考虑传动轴柔性特性的风电机组传动链外特性表现为一个欠阻尼系统, 电网电压故障期间, 双馈发电机电磁力矩的突变, 将激发了传动轴转速振荡和扭振, 可能对风电机组传动轴、齿轮箱等造成应力与疲劳损伤。

(2) 传动链虚拟变阻尼控制通过发电机转矩控制实现传动链阻尼的可控变化, 在发电机转矩可控且不超过附加转矩控制限幅值时能发挥与自身阻尼近乎相同的作用。

(3) 传动链虚拟变阻尼控制可以加快衰减电网故障激起的传动轴转速与扭矩振荡, 有效抑制传动链扭振, 利于电网故障后双馈风电机组传动链的快速稳定, 对风电机组传动链优化设计及疲劳载荷具有重要的指导意义。

参考文献

[1] JESUS LOPEZ, PABLO SANCHIS, XAVIER ROBOAM, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three phase voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 707-717.

[2] 郑涛, 李娟, 杨国生. 计及不同电网电压跌落程度的双馈风电机组定子电流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 81-87.

- ZHENG Tao, LI Juan, YANG Guosheng. Stator current analysis of doubly-fed induction generation considering different grid voltage dip levels[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 81-87.
- [3] NIIRANEN J. Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar[C] // Proc of Nordic Wind Power Conference, Chalmers University of Technology, Sweden, 2004: 1-4.
- [4] 李少林, 李庆, 谭理华, 等. 电网电压跌落时风机变流器功率平衡控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 147-154.
- LI Shaolin, LI Qing, TAN Lihua, et al. Power balance control of wind turbine converter under voltage sag in power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 147-154.
- [5] LOPEZ J, GUBIA E, SANCHIS P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.
- [6] WANG Mingyu, ZHAO Bin, LI Hui, et al. Investigation of transient models and performances for a doubly fed wind turbine under a grid fault[J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2011, 11(11): 383-392.
- [7] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89.
- WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.
- [8] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
- WANG Yong, ZHANG Chunjiang, CHAI Xiuhui, et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions on China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 14-19.
- [9] 边晓燕, 田春笋, 符杨. 提升直驱型永磁风电机组故障穿越能力的改进控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 69-74.
- BIAN Xiaoyan, TIAN Chunsun, FU Yang. A coordinated control strategy for fault ride-through capacity of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 69-74.
- [10] 杨淑英, 陈刘伟, 孙灯悦, 等. 非对称电网故障下的双馈风电机组低电压穿越暂态控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 13-19.
- YANG Shuying, CHEN Liuwei, SUN Dengyue, et al. LVRT transient compensation strategy for doubly-fed wind turbines under asymmetrical grid faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 13-19.
- [11] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
- QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [12] 秦世耀, 李少林, 王瑞明, 等. 风电机组传动链柔性建模及电网故障响应特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 728-733.
- QIN Shiyao, LI Shaolin, WANG Ruiming, et al. Study on flexible modeling of wind turbine drive train and dynamic response of grid fault[J]. Acta Energetica Sinica, 2015, 36(3): 728-733.
- [13] 贾锋, 王瑞明, 李征, 等. 电网故障下风电机组轴系扭振抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 74-80.
- JIA Feng, WANG Ruiming, LI Zheng, et al. Torsional vibration suppression of DFIG drive-chain under grid fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 74-80.
- [14] MOLINAS M, SUUL J A, UNDELAND T. Extending the life of gear box in wind generators by smoothing transient torque with STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 476-484.
- [15] MUYEEN S M. Stability augmentation of a grid-connected wind farm[M]. Springer, 2008.
- [16] 刘胜永, 张兴, 谢震, 等. 风力发电系统机械传动机构动态模型研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1257-1263.
- LIU Shengyong, ZHANG Xing, XIE Zhen, et al. A study on dynamic model of mechanical transmission in wind power generation system[J]. Acta Energetica Sinica, 2011, 32(8): 1257-1263.

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-06-28

作者简介:

胡文平(1968-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网规划、电网分析和计算工作等; E-mail: hwp8@163.com

周文(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能质量研究工作等; E-mail: hbdyyzhw@163.com

王磊(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事新能源检测及电能质量工作等。E-mail: wl_313100@126.com

(编辑 张爱琴)