

大型双馈风电机组电网故障穿越过程载荷特性分析

应 有^{1,2}, 孙 勇^{1,2}, 杨 靖^{1,2}, 洪 敏^{1,2}

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江省杭州市 310012; 2. 浙江省风力发电技术重点实验室, 浙江省杭州市 310012)

摘要: 目前,针对大型双馈风电机组电网故障穿越过程载荷特性的研究不足。首先,基于弹簧-阻尼-质量建模方法,建立了双馈风电机组传动链轴系载荷响应模型及塔架左右方向运动响应模型,获得系统固有谐振频率及阻尼系数解析表达式,理论分析结果表明,电网故障穿越过程可能引起传动链扭振和塔架左右晃动。其次,建立 GH Bladed-MATLAB 联合仿真模型,并基于此研究了电网对称与不对称故障对传动链轴系及塔架左右载荷特性的影响,仿真结果验证了理论分析的正确性。最后,进一步研究了不同有功恢复策略对机组载荷的影响,结果表明,有功功率恢复速率过快会导致机组载荷大幅增加,并得出了“机械友好型”风电机组故障电压穿越控制原则。

关键词: 双馈风电机组; 电网故障穿越; 传动链扭振; 塔架左右晃动; 载荷特性

0 引言

近年来中国风电装机容量迅猛增加,装机容量连续 8 年位居世界第一^[1]。随着风电装机容量增加,其占电力总装机容量的比重也越来越高,与此同时,不断攀升的风电穿透率导致电力系统安全稳定问题日益严重^[2-3]。为保障风电的健康可持续发展,国家通过并网导则对风电的并网行为进行了规范^[4],特别是风电的电网故障穿越,要求风电机组在电网故障期间不仅能够保持连续运行不脱网,而且能向电网注入动态无功功率以支持电网的快速恢复。

大型双馈风电机组故障穿越技术一直是学术界研究的重点。文献[2-13]均立足于风电并网或电网角度,通过风电的电气控制改善风电机组故障电气暂态性能、避免过流或过压等问题,以实现和改善大型双馈风电机组故障穿越能力,提升风电并网性能。这方面经过持续的理论研究和工程实践,技术已经比较成熟,并实现了规模化应用。但风电机组电网故障穿越过程中的机组载荷问题并未受到应有的重视,国内外也少有文献对大型双馈风电机组故障穿越过程载荷响应特性进行深入研究^[14-19]。文献[14]建立了风电机组传动链轴系柔性模型,仿真与试验分析了电网故障下双馈风电机组动态响应特性,说明了低电压穿越过程中双馈风电机组存在传

动链轴系扭振问题,尚缺乏定量及系统性载荷分析研究;文献[15]分析了电网故障情况下风电机组传动链扭振特性,并提出了一种基于发电机附加转矩控制的传动链轴系主动加阻方法,抑制了电网故障期间传动链的扭振,但缺乏对塔架影响的分析。文献[16]提出一种故障期间重启转子变流器、恢复机组有功功率的改进低电压故障穿越控制策略,以抑制风电机组风轮加速,避免触发超速停机,但这种控制策略会加剧传动链轴系扭振,不利于风电机组机械载荷安全。文献[17]提出了基于风电机组传动链轴系加阻的扭振抑制控制方法,取得了良好的控制效果,但不是针对电网故障期间的研究。文献[18]通过联合仿真,研究虚拟变阻尼控制方法,抑制电网故障期间的传动链轴系扭振,但未对大型风电机组电网故障穿越过程中的载荷响应特性进行详细分析。事实上,大型双馈风电机组在电网故障穿越过程中,会给传动链轴系、塔架等风电机组关键部件造成较大冲击与疲劳载荷,且不同电网故障影响不尽相同;另外,电网故障恢复后不同有功功率恢复控制策略对机组载荷影响较大,如控制不当,载荷与疲劳损伤的长期积累,会引发关键部件失效甚至倒塌事故。

针对上述问题,本文从风电机组自身机械载荷安全出发,开展了大型双馈风电机组故障穿越过程载荷响应特性分析,重点分析了传动链轴系、塔架等的载荷响应特性。通过基于 GH Bladed 软件与 MATLAB 软件建立的联合仿真模型,对比研究了对称与不对称故障、不同有功功率恢复控制策略对

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2020-02-15。

上网日期: 2020-04-16。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904000)。

大型双馈风电机组电网故障穿越过程中的载荷响应特性的影响,对风电机组电网故障穿越功能优化具有现实的指导意义。

1 大型风电机组机网交互耦合特性

双馈发电机电磁转矩是机网交互耦合的关键参数,电网故障或扰动会引起电磁转矩的突变或扰动^[14],故障穿越期间发电机电磁转矩的剧烈波动会给传动链轴系、塔架左右方向造成较大载荷^[15]。本章重点分析传动链轴系载荷和塔架左右方向运动位移对发电机电磁转矩扰动的响应特性。研究分析采用WD107-2500双馈机型,详细参数见附录A表A1。

1.1 传动链轴系载荷响应模型及特性分析

大型双馈风电机组传动链轴系通常采用等效质量法结合动力学方程的方法进行建模,不同等效方法可将传动链系统等效为不同的质量块模型。目前常见有六质量块模型、三质量块模型、两质量块模型和单质量块模型,其中两质量块模型能反映传动链轴系扭转动态特性且精度能满足研究需要^[19],因此,本文选取该模型为研究对象,如附录A图A1所示。各物理量均折算到低速轴侧,可得到轴系的状态方程。传动链轴系两质量块模型的动力学方程如下^[15]:

$$\begin{cases} J_r \ddot{\theta}_r = T_r - T_s \\ J_g \ddot{\theta}_g = T_s - T_g \\ B_s \dot{\theta}_s + K_s \theta_s = T_s \\ \theta_s = \theta_r - \theta_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_r 和 J_g 分别为风轮和发电机的转动惯量; B_s 为传动链轴系等效阻尼; K_s 为传动链轴系等效刚度; $\theta_r, \theta_g, \theta_s$ 分别为风轮、发电机与传动链轴系的角位移; T_r, T_g, T_s 分别为风轮、发电机与传动链轴系的转矩。

将式(1)中消除 θ_r 和 θ_g 项目,得到传动链轴系动力学方程:

$$J_r J_g \ddot{\theta}_s + (J_r + J_g) B_s \dot{\theta}_s + (J_r + J_g) K_s \theta_s = J_g T_r + J_r T_g \quad (2)$$

为研究发电机电磁转矩暂态响应对传动链轴系扭振的影响,基于式(2)建立传动链轴系扭振特征量 θ_s 与扭振激励源发电机电磁转矩 T_g 之间的传递函数如下:

$$H_1(s) = \frac{\theta_s(s)}{T_g(s)} = \frac{J_r}{J_r J_g s^2 + (J_r + J_g) B_s s + (J_r + J_g) K_s} \quad (3)$$

基于WD107-2500机型参数(见附录A表A1),

根据式(3)可得传动链轴系的幅频响应特性波特图如图1所示。可以看出,该型号的风电机组传动链轴系存在固有谐振频率 $\omega_d \approx 1.5$ Hz,固有谐振频率后,系统增益开始以 -60 dB/十倍频程的速率快速衰减。

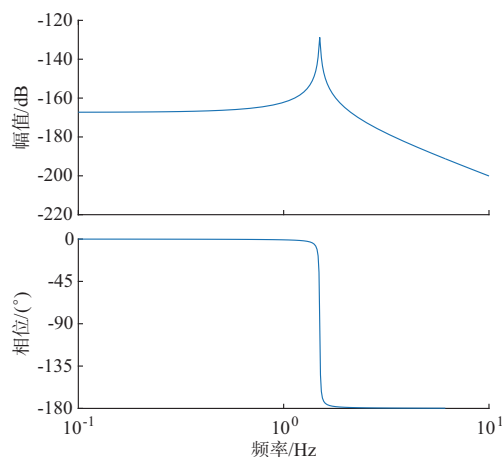


图1 传动链轴系的幅频特性波特图
Fig. 1 Bode diagrams of amplitude-frequency characteristics of drive train shafting

其固有谐振频率为:

$$\omega_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(J_g + J_r) K_s}{J_r J_g}} \quad (4)$$

其阻尼系数 ξ_d 为:

$$\xi_d = \frac{(J_r + J_g) B_s}{2 J_r J_g \omega_d} \quad (5)$$

由式(4)与式(5)可得,该型风电机组传动链轴系固有谐振频率 $\omega_d = 1.5$ Hz,阻尼系数 $\xi_d = 0.0058$ 。

综上所述,双馈风电机组传动链轴系是一个典型的欠阻尼二阶系统,因此电网电压故障情况下,双馈风电机组电磁转矩的突变易激发传动链轴系扭振,传动链轴系载荷对发电机电磁转矩的阶跃响应结果如附录A图A2所示。从图中可知,发电机电磁转矩的扰动非常容易导致传动链轴系扭振。

1.2 塔架左右方向运动响应模型及特性分析

塔架左右方向一阶模态运动方程为^[20]:

$$F_s + u T_r + u T_g = M_t \ddot{x}_s + B_t \dot{x}_s + K_t x_s \quad (6)$$

式中: F_s 为塔架左右方向气动推力; u 为风轮转矩转换塔架左右方向推力的系数; x_s 为塔架左右方向运动位移; M_t 为塔架等效质量; B_t 为塔架等效阻尼; K_t 为塔架等效刚度。

为研究发电机电磁转矩暂态响应对塔架左右方向晃动的影响,基于式(6)建立塔架左右方向运动位移特征量 x_s 与激励源发电机电磁转矩 T_g 之间的传递函数如下:

$$H_2(s) = \frac{x_s(s)}{T_g(s)} = \frac{u}{M_1 s^2 + B_1 s + K_1} \quad (7)$$

同样地,基于WD107-2500机型参数(见附录A表A1),根据式(7)可得塔架左右方向位移的幅频响应特性波特图如图2所示。从图中可以看出,该型风电机组塔架左右方向位移存在固有谐振频率 $\omega_1 \approx 0.3$ Hz,固有谐振频率后,系统增益开始以 -45 dB/十倍频程的速率快速衰减。

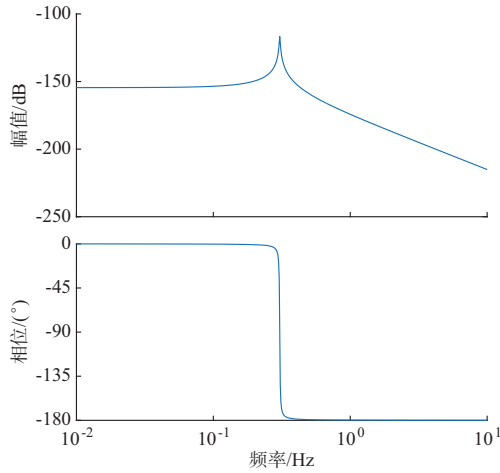


图2 塔架左右运动位移幅频特性波特图
Fig.2 Bode diagrams of amplitude-frequency characteristics of side-to-side vibration displacement for tower

其固有谐振频率 ω_1 为:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} \quad (8)$$

其阻尼系数 ξ_1 为:

$$\xi_1 = \frac{B_1}{2M_1\omega_1} \quad (9)$$

由式(8)与式(9)可得,该型风电机组塔架左右方向运动位移固有谐振频率 $\omega_1 = 0.3$ Hz,阻尼系数 $\xi_1 = 0.0064$ 。

综上所述,风电机组塔架左右方向一阶模态运行特性是一个典型的欠阻尼二阶系统。因此在电网电压故障情况下,双馈发电机电磁转矩的突变易激发塔架左右方向晃动,塔架左右方向运动位移对发电机电磁转矩的阶跃响应结果如附录A图A3所示。从图中可知,发电机电磁转矩的扰动也非常容易导致塔架左右方向晃动。

2 大型双馈风电机组联合仿真模型

为了研究大型双馈风电机组故障穿越过程机械载荷响应特性,需要构建能体现大型双馈风电机组机电耦合特性的精细化仿真模型。GH Bladed软

件^[20]是目前国内外整机制造商应用最广的商业化风机设计软件,其优势在于整机建模仿真、载荷计算、振动分析等,但要建立比较精细化的双馈式发电机、变流器、电网模型比较困难;MATLAB软件是研究双馈风电机组的并网特性和电力系统仿真计算方面应用最广泛的仿真软件,其优势在于双馈式发电机、变流器、电网等并网特性仿真研究;但在MATLAB软件中构建风轮、塔架详细模型、载荷计算、振动分析等比较困难。文献[18]提出采用GH Bladed-MATLAB联合建模方法来改进软件各自存在的局限性。本文结合GH Bladed软件和MATLAB软件各自的优点,建立了能体现大型双馈风电机组机电耦合特性的联合仿真模型如附录A图A4所示。

3 电网故障穿越过程载荷响应特性分析

通过GH Bladed-MATLAB联合仿真模型,仿真分析大型双馈风电机组故障穿越过程载荷响应特性,着重对比研究电网对称与不对称故障情况下风电机组的载荷响应情况。仿真采用平均风速为15 m/s的湍流风况,对称三相电压20%跌落(持续625 ms)和不对称两相电压20%跌落(相间短路,持续625 ms)工况。

3.1 电网对称跌落故障穿越过程载荷响应特性

电网对称跌落过程系统动态过程仿真波形如图3所示,其中绿色曲线代表正常运行工况(未发生电网故障),红色曲线代表故障穿越工况。

对电网对称跌落过程中的系统动态过程仿真结果进行数据统计分析,并对传动链轴系载荷、塔架左右方向载荷用雨流计数法处理后得到当量等效疲劳载荷(S-N斜率曲线取10)^[21],统计处理结果如表1所示。从表1可知,在电网对称跌落故障穿越过程中,发电机转速最大达到1325 r/min,但低于风机运行最大转速1350 r/min,因此没有出现超速停机。而传动链轴系最大载荷增加了25%,当量等效疲劳载荷增加了766%,塔架左右方向最大载荷增加了109%,疲劳载荷增加了426%。

从图3和表1可知,大型双馈风电机组在电网对称跌落故障穿越过程中,传动链轴系出现较大扭振,传动链轴系载荷和塔架载荷都明显增加,给传动链轴系和塔架造成较大损伤。塔架左右方向位移也明显增加,表明在电网对称跌落故障穿越过程中,塔架左右晃动明显增加。另外,在电网对称跌落故障穿越过程中,由于传动链轴系转矩平衡被打破,发电机转速有振荡恢复过程。

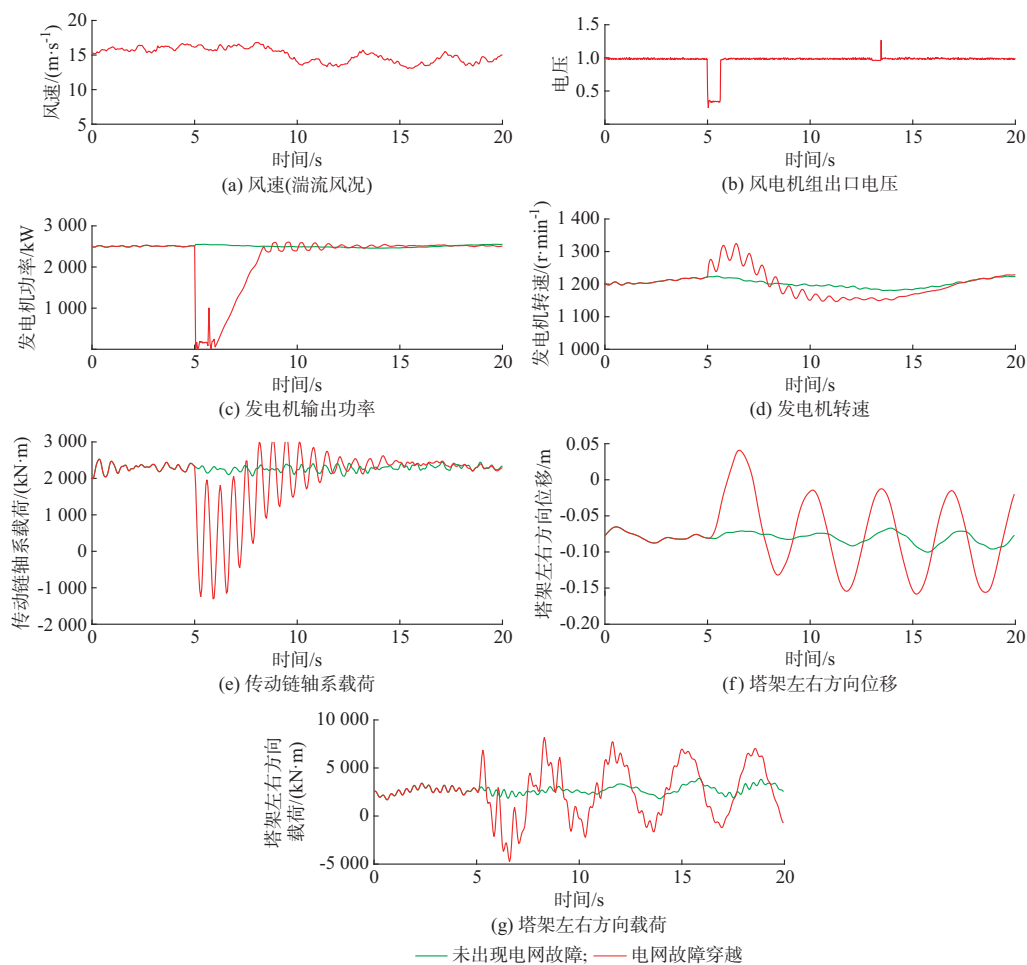


图3 电压对称跌落20%故障穿越过程载荷响应结果

Fig.3 Load response results of 20% voltage symmetrical dip fault ride-through process

表1 电压对称跌落20%故障穿越过程与正常工况的载荷结果对比
Table 1 Comparison of load results between 20% voltage symmetrical dip fault ride-through process and normal state

电网工况	发电机最大转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	传动链轴系最大 载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	传动链轴系疲劳 载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	塔架左右方向运 动最大位移/m	塔架左右方向最 大载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	塔架左右方向疲 劳载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
正常	1 224	2 531	405	0.101	3 928	1 715
20% 对称跌落故障	1 325	3 159	3 589	0.160	8 199	9 637

3.2 电网不对称跌落故障穿越过程载荷响应特性

电网不对称跌落过程系统动态过程仿真波形如图4所示。

同样,对电网不对称跌落过程中的系统动态过程仿真结果进行数据统计分析,并对传动链轴系载荷、塔架左右方向载荷用雨流计数法处理得到当量等效疲劳载荷(S-N斜率曲线取10),统计处理结果如表2所示。从表2可知,在电网不对称故障穿越过程中,发电机转速最大达到1 308 r/min,但低于风机运行最大转速1 350 r/min,因此没有出现超速停

机。而传动链轴系最大载荷增加了26%,当量等效疲劳载荷增加了623%,塔架左右方向最大载荷增加了99%,疲劳载荷增加了407%。

从图4和表2结果可知,大型双馈风电机组在电网不对称跌落故障穿越过程中,传动链轴系出现较大扭振,传动链轴系载荷和塔架载荷都明显增加,给传动链轴系和塔架造成较大损伤。塔架左右方向位移也明显增加,表明在电网不对称跌落故障穿越过程中,塔架左右晃动明显增加。另外,在电网不对称跌落故障穿越过程中,由于传动链轴系转矩平衡被打破,发电机转速有振荡恢复过程。

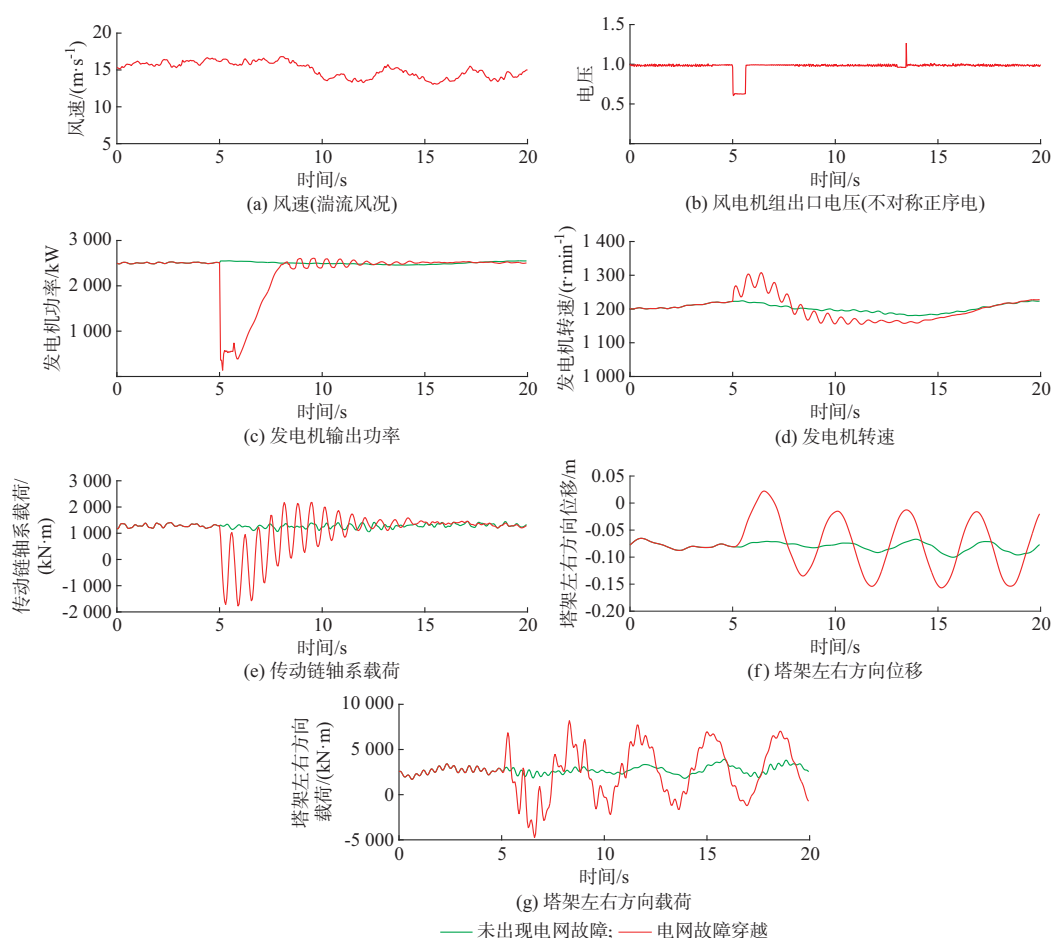


图4 电压不对称跌落20%故障穿越过程载荷响应结果

Fig. 4 Load response results of 20% voltage asymmetric dip fault ride-through process

 表2 电压不对称跌落20%故障穿越过程与正常工况的载荷结果对比
 Table 2 Comparison of load results between 20% voltage asymmetric dip fault ride-through process and normal state

电网工况	发电机最大转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	传动链轴系最大 载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	传动链轴系疲 劳载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	塔架左右方向运 动最大位移/m	塔架左右方向最 大载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	塔架左右方向疲 劳载荷/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
正常	1 224	2 531	405	0.101	3 928	1 715
20% 不对称跌落故障	1 308	3 165	2 930	0.160	7 830	8 689

对比分析表1和表2可以发现,相同控制策略、风况与跌落幅度情况下,不对称故障穿越对机组最大载荷及疲劳载荷的影响略小于对称故障穿越。究其原因这是由于不对称故障时,有一相电压跌落幅度较小,风电机组输出功率降幅小于对称电压跌落,即发电机电磁转矩扰动量小于对称故障,因此,导致传动链扭转振荡会略小,从而对传动链轴系、塔架的损伤也会略小。

4 不同有功功率恢复控制策略对故障穿越过程载荷特性的影响

仿真风况与第3章相同,电网故障选取不对称

两相电压20%跌落(相间短路,持续625 ms)工况,分析电网故障恢复后不同有功功率恢复速率对大型双馈风电机组电网故障穿越过程载荷特性的响应。设置电网故障恢复后有功功率恢复到额定功率的时间分别为100 ms,2.5 s,5 s。

不同有功功率恢复速率的系统动态过程仿真波形如图5所示。从图5可知,电网故障恢复后,有功功率恢复速率越快,发电机转速上升趋势越能得到缓解,这对避免出现发电机超速有利,但会加剧传动链扭转振荡,导致传动链轴系、塔架左右方向载荷都会增加,因此,给传动链轴系和塔架造成的损伤也会增加。

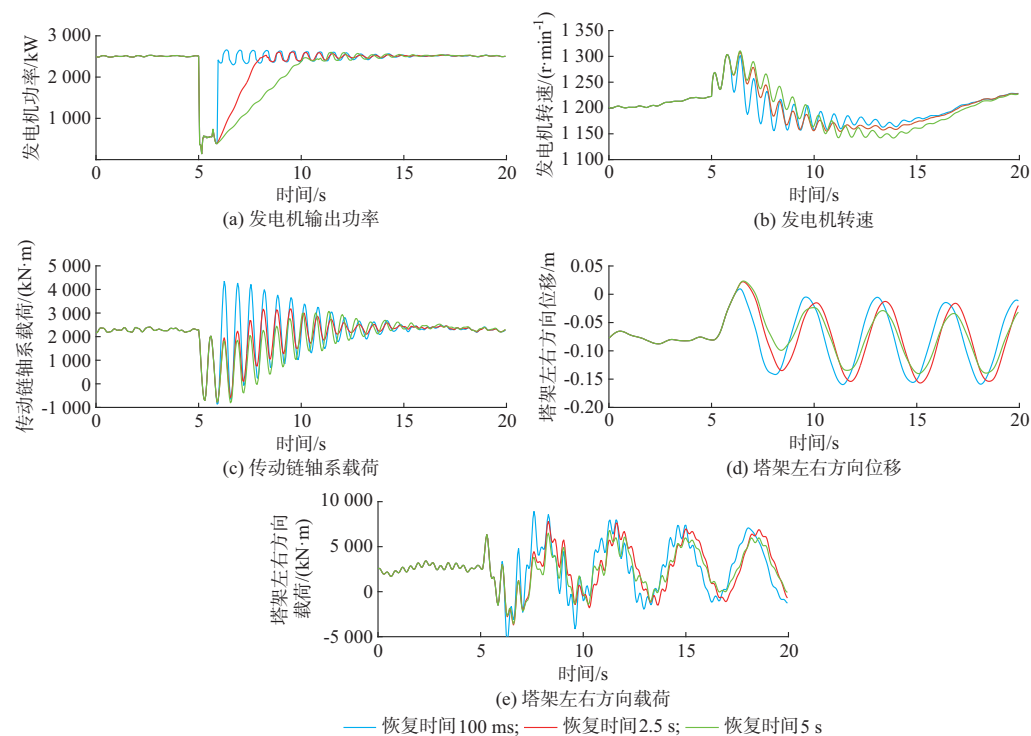


图5 不同有功恢复速率的故障穿越过程载荷响应结果
Fig. 5 Load response results of fault ride-through process with different active power recovery rates

对不同有功功率恢复速率的系统动态过程仿真结果进行数据统计分析,并对传动链轴系载荷、塔架左右方向载荷用雨流计数法处理得到当量等效疲劳载荷(S-N斜率曲线取10),统计处理结果如表3所示。从表3可知,有功功率恢复时间为100 ms比恢复时间为2.5 s时,最大转速虽然小了7 r/min,但是,传动链轴系最大载荷增加了37%,疲劳载荷增加了40%,塔架左右方向最大载荷增加了14%,疲劳载

荷增加了28%,这会显著增加传动链轴系、塔架等关键部件的损伤。而对比有功功率恢复时间为2.5 s和5 s时的控制策略,对传动链轴系载荷、塔架载荷的影响变化就不那么显著。另外,有功功率恢复时间为100 ms时的传动链轴系最大载荷达到4 354 kN·m,已超过该型机组传动链轴系的极限设计载荷(3 510 kN·m),因此,齿轮箱、联轴器等关键部件都存在损伤风险,容易引发事故。

表3 不同有功恢复速率的载荷结果对比(20%不对称电压跌落故障穿越)
Table 3 Comparison of load results with different active power recovery rates
(20% asymmetric voltage dip fault ride-through)

恢复时间/s	发电机最大转速/ (r·min ⁻¹)	传动链轴系最大 载荷/(kN·m)	传动链轴系疲劳 载荷/(kN·m)	塔架左右方向运 动最大位移/m	塔架左右方向最大 载荷/(kN·m)	塔架左右方向疲 劳载荷/(kN·m)
0.1	1 303	4 354	4 108	0.160	8 928	11 102
2.5	1 308	3 165	2 930	0.157	7 830	8 689
5.0	1 310	3 070	2 930	0.140	6 806	7 823

根据图5和表3可知,电网故障恢复后,有功功率恢复速率不宜过快,否则会使机组载荷大幅度增加;当有功功率恢复时间达到2.5 s以后,对机组载荷影响不大,因此,兼顾电网要求、机组超速及机组载荷与疲劳寿命,推荐的有功恢复时间为2.5 s。

5 结语

研究大型双馈风电机组故障穿越过程载荷特性

对保证机组安全稳定运行有指导意义。通过本文研究可以得到以下结论。

1)大型双馈风电机组在电网对称和不对称跌落故障穿越过程中,都会导致传动链出现扭振,会显著增加传动链轴系、塔架左右方向的载荷,因此,风电机组在设计时,必须考虑电网故障穿越的载荷工况,以确保机组设计安全。

2)电网故障恢复后,有功功率恢复速率越快,

发电机转速上升趋势越能得到缓解,但这会加剧传动链扭振,导致传动链轴系、塔架左右方向载荷和损伤都会增加。尤其是有功功率恢复要求特别快(恢复时间为100 ms)时,会使传动链轴系最大载荷超过极限载荷设计值,如果电网标准有类似要求,那么风电机组传动链轴系需要加强设计。

本文仅从理论和仿真角度分析了大型双馈风电机组故障穿越过程中的载荷特性,并未开展样机现场结果验证,而且传动链轴系模型未采用多体动力方法建模,导致传动链轴系载荷高频响应特性存在较大误差,使本文结论的应用存在一定的局限性。因此,下一步将重点研究基于多体动力方法建模的双馈风电机组故障穿越过程的载荷特性分析,并开展现场样机测试验证。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 舟丹. 全球十大风电国家的装机容量[J]. 中外能源, 2019, 24(7): 82.
ZHOU Dan. Installed capacity of the world's top wind turbines countries[J]. Sino-global Energy, 2019, 24(7): 82.
- [2] 洪敏, 章雷其, 迟方德, 等. 适用于弱电网的双馈风电机组新型故障穿越控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 44-50.
HONG Min, ZHANG Lei, CHI Fangde, et al. Control method for fault ride-through of DFIG-based wind turbines applied to weak grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 44-50.
- [3] 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): 149-154.
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): 149-154.
- [4] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [5] 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.
YNAG Shuying, CHEN Liuwei, SUN Dengyue, et al. LVRT transient compensation strategy for doubly-fed wind turbine under asymmetrical grid faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 13-19.
- [6] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 电网电压骤降恢复对双馈风电机组连锁脱网的影响[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 34-41.
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Effect of recovery stage of grid voltage dip on cascading trip-off of DFIG-based wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 34-41.
- [7] SHEN Yangwu, KE Deping, QIAO Wei, et al. Transient reconfiguration and coordinated control for power converters to enhance the LVRT of a DFIG wind turbine with an energy storage device [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1679-1690.
- [8] GUO Wenyong, XIAO Liye, DAI Shatao, et al. LVRT capability enhancement of DFIG with switch-type fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 332-342.
- [9] 李少林, 王伟胜, 王瑞明, 等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 76-82.
LI Shaolin, WANG Weisheng, WANG Ruiming, et al. Control strategy and experiment of high voltage ride through for DFIG-based wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 76-82.
- [10] 陈子瑜, 李庆, 王伟胜. 传递熵算法在风电机组故障穿越特征分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3751-3757.
CHEN Ziyu, LI Qing, WANG Weisheng. Characteristic analysis of wind turbine fault ride through procedure using transfer entropy [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3751-3757.
- [11] 张琛, 李征, 蔡旭, 等. 采用定子串联阻抗的双馈风电机组低电压主动穿越技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2943-2951.
ZHANG Chen, LI Zheng, CAI Xu, et al. An active low voltage ride through strategy of DFIG-based wind turbine using stator series impedance [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2943-2951.
- [12] 蔡恩雨, 焦冲, 王冬冬, 等. 双馈风电机组零电压穿越能力测试方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 137-142.
CAI Enyu, JIAO Chong, WANG Dongdong, et al. Test scheme of zero voltage ride through capability for DFIG-based wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 137-142.
- [13] 厉璇, 宋强, 刘文华, 等. 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 31-36.
LI Xuan, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Impact of fault ride-through methods on wind power generators in a VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 31-36.
- [14] 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 Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(3): 728-733.
- [15] 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.
- [16] 周香珍, 侯延鹏, 曲锐, 等. 考虑转矩失衡的双馈感应风电机组低电压穿越控制研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(20): 107-112.

- ZHOU Xiangzhen, HOU Yanpeng, QU Rui, et al. Research on voltage ride-through for doubly fed induction generator-based wind turbines in consideration of unbalance of rotor torques[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(20): 107-112.
- [17] 张琛, 李征, 高强, 等. 双馈风电机组的不同控制策略对轴系振荡的阻尼作用[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(27): 135-144.
- ZHANG Chen, LI Zheng, GAO Qiang, et al. Damping effects on torsional oscillation of DFIG drive-chain using different control strategies[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(27): 135-144.
- [18] 胡文平, 周文, 王磊, 等. 基于联合仿真的风电机组低电压穿越传动链扭转抑制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 197-201.
- HU Wenping, ZHOU Wen, WANG Lei, et al. Study on suppression strategy for wind turbine drive train torsional vibration under grid fault based on co-simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 197-201.
- [19] 丁明, 王冬君, 韩平平, 等. 风力发电传动系统通用化建模方法研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(10): 2881-2887.
- DING Ming, WANG Dongjun, HAN Pingping, et al. Research on generalized modeling method of wind power drive-train system[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(10): 2881-2887.
- [20] 应有, 朱重喜, 杨帆, 等. 大型风电机组塔架主动阻尼控制技术[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 54-60.
- YING You, ZHU Chongxi, YANG Fan, et al. Development of active tower damping control on wind turbines[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2015, 36(1): 54-60.
- [21] 应有, 许国东. 基于载荷优化的风电机组变桨控制技术研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(16): 106-111.
- YING You, XU Guodong. Development of pitch control for load reduction on wind turbines[J]. *China Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(16): 106-111.
- 应 有(1983—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 风电系统控制技术、风电并网技术。E-mail: yingyou@chinawindecy.com
- 孙 勇(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 风电系统控制技术、风电载荷仿真技术。E-mail: sunyong@chinawindecy.com
- 杨 靖(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 风电系统控制技术、风电并网技术。E-mail: yangjing@chinawindecy.com

(编辑 章黎)

Load Characteristic Analysis of Grid Fault Ride-through Process for DFIG Based Large Wind Turbine

YING You^{1,2}, SUN Yong^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, HONG Min^{1,2}

(1. Zhejiang Windecy Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Wind Power Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Currently, the research on the load characteristics of grid fault ride-through of doubly-fed induction generator (DFIG) based wind turbines is insufficient. Firstly, based on the spring-damping-mass modeling method, response models of DFIG based wind turbines for the load of drive train shafting and the side-to-side vibration of tower are established, and then the analytical expressions of the system natural resonance frequency and damping coefficient are obtained. The theoretical analysis results show that the grid fault ride-through process may cause torsional vibration of the drive train and the side-to-side vibration of tower. Secondly, a co-simulation model of GH Bladed and MATLAB is established, and the effects of symmetrical and asymmetrical grid fault ride-through processes on load characteristics of the drive train shafting and tower based on the co-simulation model are studied. Simulation results verify the correctness of the theoretical analysis. Finally, the influence of different active power recovery strategies on the load of wind turbines is further analyzed. The research results show that the over-fast active power recovery rate will significantly increase the load of wind turbines. Therefore, the principle of “mechanically friendly” grid fault ride-through control for wind turbines is further proposed.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0904000).

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG) based wind turbine; grid fault ride-through; torsional vibration of drive train; side-to-side vibration of tower; load characteristics

