

# DFIG 高电压穿越技术研究

史春飞, 章敏凤, 马利祥

(安徽信息工程学院 电气与电子工程学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘 要:**为实现双馈风力发电机(DFIG, Doubly fed Induction Generator)系统的高电压穿越(HVRT, High Voltage Ride Through):首先,对高电压故障期间DFIG系统暂态过程进行分析.其次,针对高电压故障期间的DFIG系统暂态特性,提出实现DFIG高电压穿越的控制策略.最后,在MATLAB/Simulink中搭建DFIG模型,验证所提出的控制策略.仿真结果表明,所提出的控制策略在高电压故障期间显著提高了DFIG系统高电压穿越能力,有效保护了DFIG机组的安全,减小故障对于电网系统的冲击.

**关键词:**双馈风力发电机;高电压穿越;暂态过程;控制策略

中图分类号:TM315

文献标识码:A

文章编号:1673-1670(2023)05-0029-05

## 0 引言

电网的故障通常分为低电压故障与高电压故障.针对电网发生低电压故障期间风电机组的低电压穿越(LVRT, Low Voltage Ride Through),许多学者进行了大量研究,使得风电系统在不同故障情况下,能够安全穿越故障区间;但是,当电网发生高电压故障时,如何实现风电机组的HVRT,国内外学者研究较少.另外,高电压故障对于风电机组以及电网带来的冲击不容忽视,亟须解决<sup>[1-3]</sup>.

若电网出现短路故障情况,风速急剧增加导致风电机组注入电网的有功功率大幅波动,以及使用无功补偿装置投入风电系统,切除风电系统等情况,都会使得电网电压骤然升高.若不采取相应HVRT措施稳定电力系统电压,将会使得风电机组发生脱网的风险,风电场进而发生解体的事故<sup>[4]</sup>.而在电网高电压故障期间,由于风电场的解体,没有给予电网系统一定电压与频率的支撑,使得电网系统高电压故障进一步恶化,产生恶性循环<sup>[5-6]</sup>.所以针对电网发生高电压故障,如何实现风电机组的高电压穿越,显得十分必要,既保护了风电场的安全,又保护了电网的安全.

随着风电事业的迅速发展,在风电场装机比例中,DFIG在所有风力发电机机型中所占比例越来越高.DFIG是否安全运行对于风电系统来说起着举足轻重的作用.而在电网发生高电压故障期间,含DFIG机型的风电场能否穿越故障区间成为一项重要技术指标<sup>[7-8]</sup>.

文献[9-10]分析了在电网发生高电压故障期间变流器有功、无功功率两者之间的关系,提出基于动态无功支撑的HVRT方案.文献[11-12]从动态无功补偿控制方面分析了高电压现象产生的主要原因,针对传统控制的方法,提出了一种改进动态无功功率调节控制的方法,该方法显著地提升了DFIG的HVRT能力,并且不需要额外的硬件电路,使得该方法对于传统控制方法来说节省了成本;但是该方法有一定的局限性,对于电机参数要求比较高,当电网发生较为严重的高电压故障时,由于DFIG机型自身变流器容量大小的因素,使DFIG系统的HVRT能力受到很大制约.文献[13]通过混合储能系统实现DFIG高电压穿越,当电网发生高电压故障时能够通过储能系统吸收风电机组输出的有功功率,避免在故障期间持续地向电网输送有功功率,减缓电网高电压故障程度,使得

收稿日期:2023-03-15

基金项目:芜湖市科技计划重点研发项目(2021yf28)

作者简介:史春飞(1989—),男,安徽省阜阳市人,工学硕士,安徽信息工程学院电气与电子工程学院助教,主要从事复杂系统建模、控制与优化研究.

通信作者:马利祥(1985—),男,山东省临沂市人,工学博士,安徽信息工程学院电气与电子工程学院高级工程师,主要从事软件无线电技术研究.



DFIG 机组安全穿越高电压故障区间. 但是, 该方法硬件成本太高, 对于储能系统与风电系统之间的协调控制难度较大. 文献[14]分析了高电压故障期间 DFIG 机组的运行特性, 但是, 对于电磁过渡过程没有进行相关详细的理论分析与公式推导. 文献[15-16]对 DFIG 各个分量电磁暂态特性的变化进行了详细分析, 但是, 仅对发生高电压故障期间进行分析, 没有研究在故障发生、结束时, DFIG 电磁暂态特性剧烈变化的原因, 以及对于这一现象的处理措施.

综上所述, 针对 DFIG 系统高电压故障特性, 提出基于 Crowbar 的 DFIG 系统高电压穿越控制方法, 实现 DFIG 系统穿越高电压故障区间, 保护风电机组以及电网安全.

## 1 电网发生高电压故障期间 DFIG 的暂态过程分析

图 1 为 DFIG 机组在两相旋转坐标系下的等效电路, 已把转子侧参数归算到定子侧.

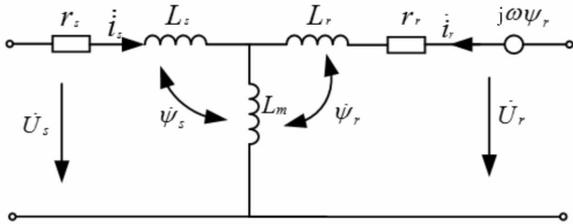


图 1 DFIG 机组等效电路

根据 DFIG 机组的等效电路图, 有以下方程:

$$U_s = r_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt}, \quad (1)$$

$$U_r = r_r i_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega\Psi_r, \quad (2)$$

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r, \quad (3)$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_m i_s. \quad (4)$$

式中  $\omega$  为旋转角速度,  $r$  为电阻,  $L$  为电感,  $L_m$  为互感,  $s, r$  分别为定子和转子分量.

由式(3)、(4)可得

$$\Psi_r = \frac{L_m}{L_s} \Psi_s - \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_r = \frac{L_m}{L_s} \Psi_s - L_{r\sigma} i_r. \quad (5)$$

其中  $L_{r\sigma} = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$  为发电机的暂态电感.

由式(2)、(5)得转子电压

$$U_r = \frac{L_m}{L_s} \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) \Psi_s + \left[ r_r + L_{r\sigma} \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) \right] i_r. \quad (6)$$

转子电动势

$$U_{r0} = \frac{L_m}{L_s} \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) \Psi_s. \quad (7)$$

当 DFIG 机组在稳态情况下, 定子电压空间矢量为一个幅值为  $U_{se}$ , 以同步旋转角速度为  $\omega_s$  的矢量. 表达式为

$$U_s = U_{se} e^{j\omega_s t}. \quad (8)$$

由式(1), 在忽略定子电阻的情况下得

$$U_s = \frac{d\Psi_s}{dt}. \quad (9)$$

由式(8)、(9)得相应的定子磁链方程

$$\Psi_s = \frac{U_{se}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t}. \quad (10)$$

由式(7)、(10)得

$$U_{r0} = \frac{L_m}{L_s} j\omega_r \Psi_s = \frac{L_m \omega_r}{L_s \omega_s} U_{se} e^{j\omega_s t} = s \frac{L_m}{L_s} U_{se} e^{j\omega_s t}. \quad (11)$$

式中,  $\omega_r = \omega_s - \omega$ ,  $s = \omega_r / \omega_s$  为转差率.

上述假设转子为开路下的转子电压. 若变流器驱动转子时, 由式(6)、(10)得到转子电压方程:

$$U_r = s \frac{L_m}{L_s} U_{se} e^{j\omega_s t} + \left[ r_r + L_{r\sigma} \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) \right] i_r. \quad (12)$$

由于大容量 DFIG 机组转子电阻、暂态电感比较小, 可以忽略不计, 在转子开路的情况下进行分析, 假设开路电压与 DFIG 机组转子电压相同.

当  $t = t_0$  时, 电网电压

$$U_s = \begin{cases} U_{se} e^{j\omega_s t}, & t < t_0; \\ (1+k) U_{se} e^{j\omega_s t}, & t > t_0. \end{cases} \quad (13)$$

其中  $k = (U_s - U_{se}) / U_{se}$  为电网电压骤升幅度. 由式(1)、(3)得

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - \frac{r_s}{L_s} \Psi_s. \quad (14)$$

最后由式(13)、(14)可得, 若发生高电压故障, 定子磁链

$$\Psi_s = (1+k) \frac{U_{se}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} - k \frac{U_{se}}{j\omega_s} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} e^{j\omega_s t_0}. \quad (15)$$

式中,  $\tau = L_s / r_s$  为 DFIG 定子电磁时间常数.

由式(15)知, 若电网发生高电压故障, 强制分量、自然分量共同组成定子磁链, 电网电压对定子磁链中的强制分量有较大影响, 此分量旋转速度为  $\omega_s$ , 在电网发生高电压故障时能够维持磁链连续性, 所以产生了自然磁链. 自然磁链幅值大小是不断衰减的一个过程. 在高电压故障时, 转子电动势

$$U_{r0}(t > t_0) =$$

$$\frac{L_m}{L_s} [s(1+k)U_{se}e^{j\omega_s t} + (1+s)kU_{se}e^{j\omega_s t_0} + k \frac{U_{se}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}]. \quad (16)$$

## 2 中国国家标准

根据我国目前风力发电的实际发展情况,国家制定了适合我国国情的高电压穿越标准,要求当电网发生高电压故障时,并网点电压若上升至 1.3 p. u. ,DFIG 机组能够并网运行 0.5 s;电压若上升至 1.25 p. u. ,风机能够并网运行 1 s;电压若上升至 1.2 p. u. ,风机能够并网运行 10 s;电压若上升至 1.1 p. u. ,风机能够不脱网一直保持运行状态,如图 2 所示.

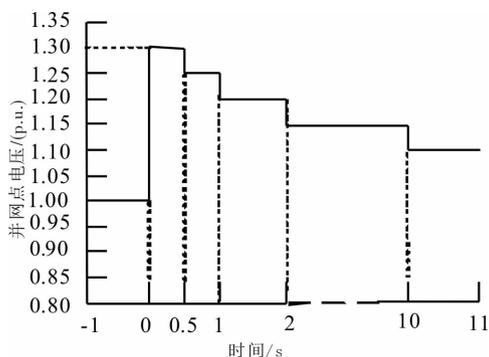


图 2 风电机组故障穿越能力

## 3 双馈风机高电压穿越控制策略

DFIG 高电压穿越控制方法如图 3 所示. 首先,故障检测模块将检测到的并网点进行取绝对值运算,使得故障检测模块输出的信号波形周期为原始电网电压的一半. 其次,将故障检测模块的输出信号与设置的高电压报警阈值  $U_{max}$  进行比较. 当检测信号小于设定阈值  $U_{max}$  时,说明电网没有发生高电压故障,故障检测模块继续周而复始地进行检测,风电机组继续平稳地运行. 当故障检测模块检测到的信号大于设定阈值  $U_{max}$  时,与  $U_{max}$  进行相应运算,数据处理运算输出 Crowbar 投切控制信号 3. 使得 Crowbar 电路投入,切除 DFIG 系统,从而保护风电机组安全,实现高电压穿越.

## 4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建 DFIG 风电系统. 首先,在验证 DFIG 系统稳定的基础上,进行故障仿真实验. 当 DFIG 系统并网点发生三相对称高电

压故障,且故障时间区间为 1 s ~ 1.5 s 时,高电压故障期间电压上升至 1.3 p. u. ,如图 4 所示.

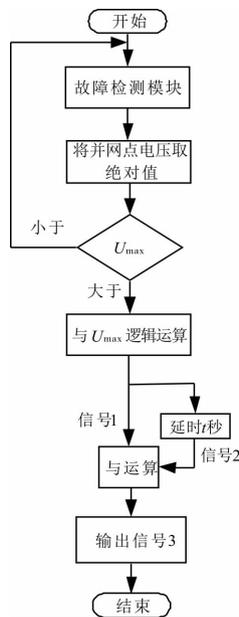


图 3 控制方法

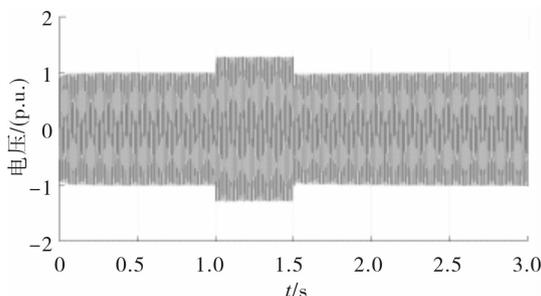


图 4 高电压故障并网点电压

若在 DFIG 系统中投入高电压控制策略,通过检测模块的实时信号监控,进行信号处理,得到 Crowbar 动作控制信号,如图 5 所示. 当电网稳态运行时,控制信号处于低电平,Crowbar 电路未被投入 DFIG 系统中,Crowbar 电路也未被导通;当电网在 1.0 s 时,发生高电压故障,可以看出控制信号立即从低电平变为高电平,将 Crowbar 电路投入 DFIG 系统中,并驱动 Crowbar 电路导通,用于保护 DFIG 系统,在 1.5 s 故障消除后,又将 Crowbar 电路从 DFIG 系统中切除,使得 DFIG 系统能够迅速恢复到稳定运行状态.

为检验提出的高电压穿越策略的有效性,是否能够实现 DFIG 风电系统的高电压穿越. 分别对有无保护措施的情况下,风电系统的各个输出参数进行对比分析.

图 6、图 7 为未投入保护措施下的 DFIG 风电机组转、定子侧电流波形,可以看出在发生高电压

故障期间,转、定子侧电流发生波动,特别是定子侧电流在故障发生期间出现长时间的过电流,两者对DFIG系统稳定造成一定冲击.

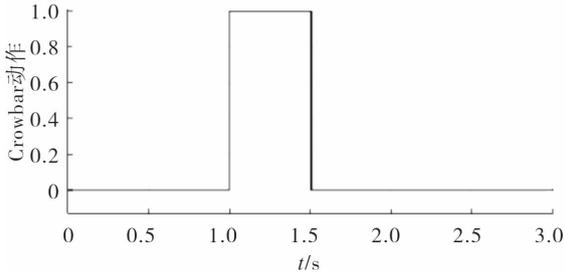


图5 Crowbar 动作控制信号

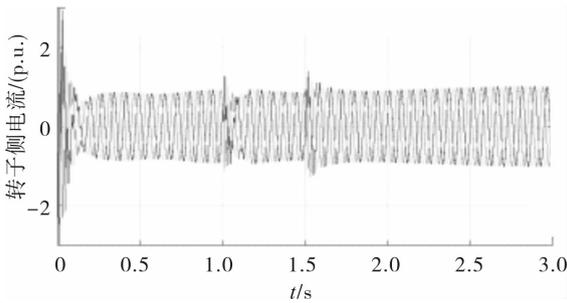


图6 未投入保护措施转子侧电流

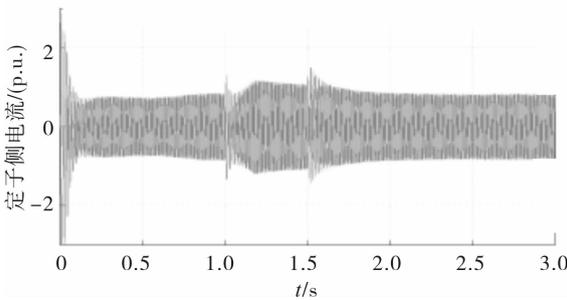


图7 未投入保护措施定子侧电流

当投入保护措施后,DFIG 风电机组转、定子侧电流波形如图8、图9所示.在没有发生故障前,检测模块检测到并网点电压没有超过设定阈值,Crowbar 电路未被启动,没有投入DFIG系统中.在并网点发生高电压故障时,电压幅度超出设定阈值,此时检测电路的输出信号控制Crowbar 电路投入DFIG系统中.在投入Crowbar 保护电路期间,DFIG 风电机组的转子侧电流幅值被消减至几乎为零,转子侧电流得到有效控制,而定子侧电流也得到极大的消减,有效地减缓了高电压故障期间转子侧电流对DFIG系统稳定的冲击,有效地实现了DFIG风电机组的低电压穿越.

如图10为DFIG风电机组投入保护前后转矩的变化,当未投入保护措施时,在发生高电压故障

期间,转矩发生剧烈波动,对于风电机组的安全运行存在很大隐患.当投入保护措施后,使得风电机组的转矩迅速降为零值附近,极大地消除了高电压故障期间转矩波动产生的噪声、电磁干扰以及可能引起的共振对风电机组的危害.图11为风电机组有功功率在投入保护前后的变化,当投入保护后,Crowbar 电路卸荷了风电机组的有功功率,使得输出有功功率降为零值附近,高电压故障期间,DFIG系统几乎没有向电网输出有功功率,有效地避免了故障期间由于DFIG系统输出有功功率使得电网高电压故障的恶化.

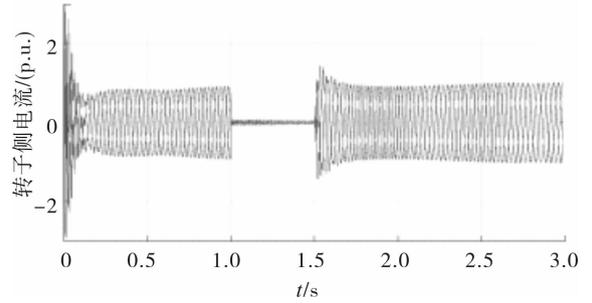


图8 投入保护措施转子侧电流

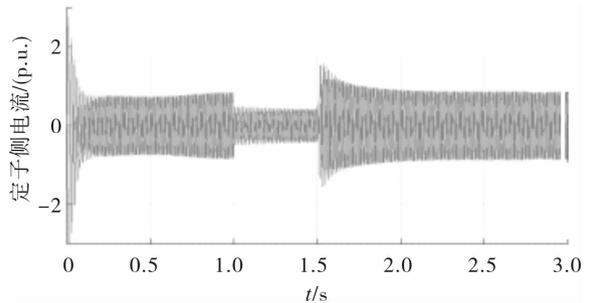


图9 投入保护措施定子侧电流

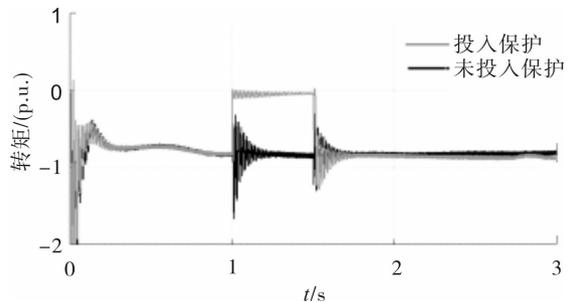


图10 转矩

图12为风电机组直流母线电压变化,当电网电压骤升到1.3 p.u.时,在故障发生开始与结束时直流母线电压骤升到1 180 V,对变流器产生很大的冲击,当投入HVRT控制策略后,极大地消除了直流母线的波动,在故障期间直流母线电压几乎回到原值1 150 V,仅在故障开始和结束时有微小波动,实现了DFIG风电机组的高电压穿越.

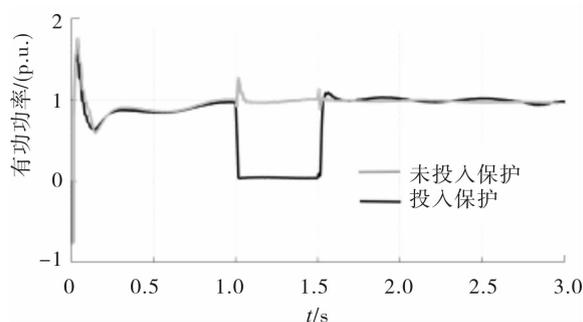


图 11 有功功率

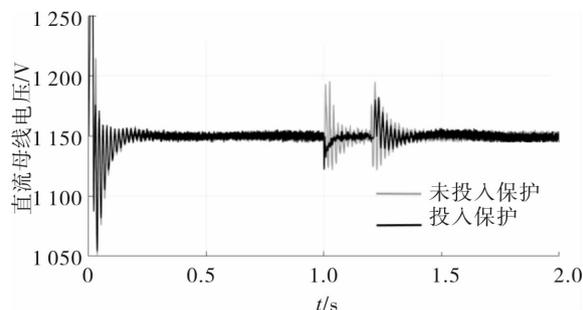


图 12 直流母线电压

## 5 结论

笔者提出的 DFIG 系统高电压穿越控制策略, 在高电压故障期间能够迅速地投入 DFIG 系统中, 在故障期间有效地消减了 DFIG 机组定、转子侧的过电流, 极大地消除了风电机组转矩的震荡, 使得风电机组的输出有功功率基本被消耗; 同时, 在故障期间对直流母线电压的波动也有一定的抑制. 在高电压故障期间提出的控制策略, 有效地提高了 DFIG 系统的高电压穿越能力.

## 参考文献:

[1] 张公生, 王维庆, 王海云, 等. 考虑变直流母线电压参考值的直驱风电机组高电压穿越控制策略[J]. 可再生能源, 2022(6): 816-821.

[2] 姜惠兰, 王绍辉, 李希钰, 等. 双馈异步风力发电机低电压连锁故障暂态特性精确分析及穿越方案[J]. 电网技术, 2021(10): 4076-4083.

[3] LIU X Y, LI X W, JIAO D H. Theoretical study on control strategy of grid-connected high voltage ride through in doubly-fed wind farm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107453-107464.

[4] 张瑞祥, 潘文林, 郑加取, 等. 基于 SMES 协同去磁的双馈风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 水电能源科学, 2021(8): 185-189, 152.

[5] 应有, 张书涵, 杨靖. 双馈式风电机组高电压穿越技术联合仿真研究[J]. 电气自动化, 2020(3): 59-62.

[6] WANG Y, WU Q W, XU H H, et al. Fast coordinated control of DFIG wind turbine generators for low and high voltage ride-through[J]. Energies, 2014, 7: 4140-4156.

[7] 周杰, 赵豆豆, 杨靖, 等. 双馈风电机组高电压穿越技术研究及测试研究[J]. 机电工程, 2017(4): 394-398.

[8] HAN J, MIAO S H, CHEN Z, et al. A novel wind farm equivalent model for high voltage ride through analysis based on multi-view incremental transfer clustering[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 135: 107527.

[9] 王德胜, 颜湘武, 刘辉, 等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高电压穿越改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2022(3): 957-968.

[10] 兰传盛, 潘庭龙. 考虑无功支撑的双馈风机高电压穿越控制策略[J]. 电子技术与软件工程, 2020(5): 239-243.

[11] 汪颖, 郑加取, 郑子萱, 等. 无功补偿与去磁电流协同控制的改进 DFIG 高电压穿越策略[J]. 水电能源科学, 2019(12): 166-170.

[12] 张旭, 王怡, 刘博文, 等. 基于转子无功电流动态调整的 DFIG 全过程高电压穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2022(22): 142-150.

[13] 蒋子傲, 崔双喜. 基于混合储能系统的高电压穿越控制策略[J]. 电测与仪表, 2022(3): 125-130.

[14] 孙晓艳, 高阳, 彭力. 计及损耗的双馈感应风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 智慧电力, 2020(12): 33-39.

[15] 王艳娟, 孙潇. 电网电压骤升时 DFIG 定转子电流分析及无功电流配置改进[J]. 电机与控制应用, 2022(4): 103-108.

[16] 张谦, 蒋永梅, 丁敏, 等. 双馈风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. 浙江电力, 2019(2): 57-61.

(责任编辑: 王彦江)

