

风电经高压直流输电系统并网的暂态过电压抑制策略研究

吴康¹,熊俊杰¹,赵伟哲¹,乔颖²,张仕钰²

(1.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096;2.清华大学电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要:大规模新能源集中开发、汇聚后经特高压直流外送至远方负荷中心是我国新能源消纳的重要形式之一。典型交/直流故障容易引发送端系统的暂态过电压问题,可能导致新能源机组因高压脱网,不利于电力系统的安全稳定运行。故障恢复阶段的暂态过电压来源于系统内大量无功源的无功支撑回撤滞后、时序紊乱等导致的过剩无功。文中推导了故障电压先低后高过程产生机理,定量分析了风电机组与静止无功补偿器的无功回撤时滞,提出了风电场变无功支撑电流与无功补偿设备支路投切的时序动作方案,并基于 MATLAB/Simulink 算法建立仿真模型,验证了所提策略的合理性。

关键词:高压直流输电系统;暂态过电压;低电压穿越;静止无功补偿器;时序动作方案

中图分类号:TM 86 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)05-0001-07

0 引言

大规模新能源集中开发、汇聚后经特高压直流外送至远方负荷中心是我国新能源消纳的重要形式之一。然而,送端交流近区发生短路故障、换相失败、直流闭锁等典型交/直流故障后,送端系统易出现因无功过剩、错位补偿导致的电压失稳,进而引起新能源机组因电压问题脱网^[1]。

针对多无功源错位补偿导致故障恢复过程中,关键节点产生暂态过电压的问题,相关研究^[1-3]从不同角度剖析其产生机理与影响因素。针对风电机组低电压穿越参数对系统暂态过电压的影响分析,文献[4-6]分析了故障穿越与恢复期间风电场的暂态无功特性,推导了恢复区盈余无功的来源;文献[7-9]指出低穿区有功无功控制、恢复区有功恢复速率均会影响故障后系统暂态过电压水平;文献[10]优化了新能源高/低电压穿越期间的控制参数,增强了系统功角稳定,缓解了暂态过电压问题;文献[11]分析故障过程中机组无功输出的变化并进行优化。针对无功补偿设备对系统暂态过电压的影响分析,文献

[12]刻画了 SVC 的电压无功暂态响应轨迹,指出了其无功错位补偿原理,并给出了一种根据电压偏差信号变参数的优化控制策略;文献[13]根据 SVC 控制框图推导其传递函数,结合傅立叶分解和控制系统输入信号频率与滞后时间关系,定量分析了 SVC 控制系统的滞后时间。针对故障恢复过程暂态过电压问题,现有研究多从优化新能源故障穿越参数、改进换流站控制策略的角度进行。文献[14-16]指出风电机组的电压信号检测滞后会助增交流电网暂态过电压,通过附加延时补偿控制,实现过电压峰值的降低;文献[17]通过快速切除换流站滤波器、增设无功补偿设备的方式,减小了直流故障下的换流站过电压水平;文献[18]分析了换流站控制器电压参考值对过电压的影响,通过调节控制器参数,缓解了故障后暂态过电压问题。

综上所述,改善直流送端的暂态过电压问题必须由风电机组的新能源故障穿越与换流站控制联合优化实现。文中分析了风电直流外送系统发生送端换流站近区交流三相接地故障后,关键节点故障电压波形先低后高的特点产生机理,建立并仿真了故障恢复阶段各无功源无功回撤时序滞后模型,并在此基础上

收稿日期:2025-02-20

作者简介:吴康(1997),男,硕士,工程师,从事新能源运行控制研究。

$$\begin{cases} U_L = \frac{U_S + (Z_S + Z_{22})(I_W + I_{SVC}) - Z_S I_D}{Z_S + Z_{22} + Z_f} Z_f + \\ (I_W + I_{SVC}) Z_{21} \\ U_{PCC} = \frac{U_S + (Z_S + Z_{22})(I_W + I_{SVC}) - Z_S I_D}{Z_S + Z_{22} + Z_f} Z_f + \\ (I_W + I_{SVC}) Z_{21} + I_W Z_1 \\ U_D = \frac{Z_S Z_f}{Z_S + Z_{22} + Z_f} (I_W + I_{SVC}) + \frac{Z_{22}(U_S - I_D Z_S)}{Z_S + Z_{22}} + \\ \frac{Z_S Z_f (U_S - I_D Z_S)}{(Z_S + Z_{22} + Z_f)(Z_S + Z_{22})} \end{cases} \quad (6)$$

由于短路阻抗 Z_f 的值很小,故障后关键节点电压跌落明显。结合式(6)可知,风电场低电压穿越过程中发出的电流水平和SVC的无功支撑电流会影响故障后系统中关键节点的电压跌落深度。

故障切除阶段,短路阻抗断开,各关键节点电压可表示为:

$$\begin{cases} U_D = U_S - [I_D - (I_W + I_{SVC})] Z_S \\ U_L = U_S - [I_D - (I_W + I_{SVC})] Z_S + I_{SVC} Z_2 \\ U_{PCC} = U_S - [I_D - (I_W + I_{SVC})] Z_S + I_{SVC} Z_2 + I_W Z_1 \end{cases} \quad (7)$$

若不能及时回撤无功电流(减小 I_W 、恢复 $I_{SVC} \approx 0$),各关键节点电压会有相应抬升,即出现故障恢复阶段的暂态过电压现象。

2 无功支撑时序紊乱助增暂态过电压机理分析

2.1 风电机组低电压穿越控制对系统暂态过电压的影响

随着风电规模的增加,其在系统中的角色也由“负荷”向“电源”转变。由相关标准^[19]可知,当电力系统发生三相短路故障时,风电场动态无功电流增量应响应并网点电压变化,如式(8)所示。

$$\nabla I_t = K(0.9 - U_{PCC})I_N, 0.2 \leq U_{PCC} \leq 0.9 \quad (8)$$

式中: ∇I_t 为风电场注入的动态无功电流增量; K 为风电场动态无功电流比例系数(下称“补偿系数”),取值范围为1.5~3; U_{PCC} 为风电场并网点电压标幺值; I_N 为风电场额定电流。

对双馈风电机组而言,稳态下可以通过转子侧变流器控制有功/无功功率的解耦输出;在故障期间,转子侧变流器由功率控制模式切换至定电流控制模式,控制向

电网注入的有功和无功电流,实现双馈风电机组的低电压穿越控制策略多样化。文中采取文献[20]方法,以定子电压定向矢量控制为例,则在低电压穿越期间,双馈风电机组定子电流d、q轴分量参考值可表示为:

$$\begin{cases} i_{sq-ref} = 1.5(0.9 - U_{PCC})I_N \left(1 - \frac{\omega_r - \omega}{\omega_r}\right) \\ i_{sd-ref} = \sqrt{i_{smax}^2 - i_{sq-ref}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_{PCC} 为风电场PCC点电压; I_N 为风电场额定电流; ω_r 为风电机组转子旋转电角速度; ω 为电网电压频率对应旋转电角速度; i_{smax} 为定子侧最大电流。

双馈风电机组的转子侧变流器控制框图如图3所示。 P_{s-ref} 、 Q_{s-ref} 表示双馈风电机组定子有功功率、无功功率参考值, P_s 、 Q_s 表示双馈风电机组定子有功功率、无功功率实际值, i_{rd-ref} 、 i_{rq-ref} 表示双馈风电机组转子电流d、q轴分量参考值, i_{rd} 、 i_{rq} 表示双馈风电机组转子电流d、q轴分量实际值, L_m 为dq坐标系下定、转子同轴等效绕组间的互感, L_s 为dq坐标系中定子等效两相绕组间的自感, ω_s 为转差角频率, U_s 为定子电压, U_{rd} 、 U_{rq} 为转子电压d、q轴分量。

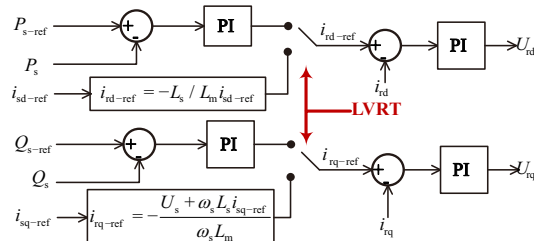


图3 故障穿越控制框图

图3中,取电流内环传递函数参数典型值 $K_p=0.6$ 、 $K_i=8$,则单位阶跃信号输入条件下,该控制器的指令输入与输出关系仿真结果如图4所示。可以看出,低电压穿越控制下的风电机组无功电流响应速度时滞约为0.32 s。

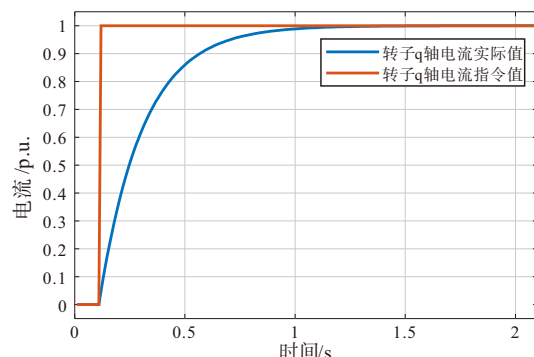


图4 电流内环指令值与输出

2.2 SVC控制延时对系统暂态过电压的影响

风电汇集系统发生故障后,汇集站配置的无功补偿设备会感受到电压波动,根据预设的控制方式对接入节点电压进行补偿。但在故障过程中,受到锁相环节、电压判断模块和控制器等因素的影响,SVC设备可能出现响应时间长、动作滞后的现象,导致节点无功补偿过剩,进一步助增暂态过电压水平。

SVC装置具备定电压/定电纳控制模式,其典型结构如图5所示,由晶间管控制的并联电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)和晶闸管投切的并联电容器组(thyristor switched capacitors, TSC)组成。

在定电压控制模式下,SVC根据被控节点电压测量值 U_{meas} 与电压参考值 U_{ref} 之间的偏差,调节并联电容与并联电抗的值,SVC输出的无功功率即随之改变,控制SVC所补偿节点的电压。SVC无功出力 Q_{SVC} 可表示为:

$$Q_{\text{SVC}} = \left[\omega C_{\text{SVC}} - \frac{2(\pi - \alpha_{\text{ter}})}{\pi X_{\text{SVC}}} \right] U_{\text{SVC}}^2 \quad (10)$$

式中: C_{SVC} 为SVC内部投入电容; X_{SVC} 为SVC内部投入电感; α_{ter} 为TCR支路晶闸管触发角; U_{SVC} 为SVC接入节点电压。

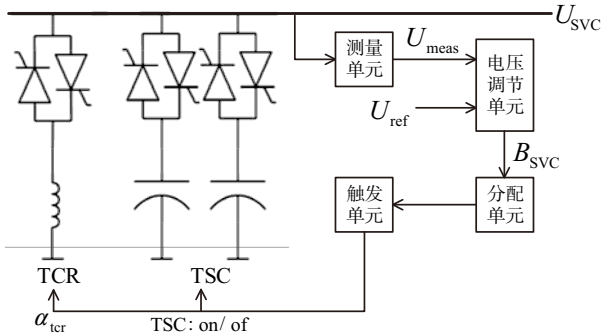


图5 TCR+TSC型SVC控制结构

SVC电压调节单元的控制模型如图6所示。

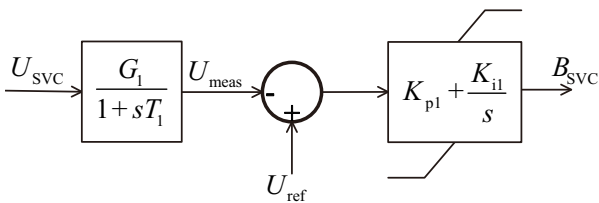


图6 SVC测量单元与电压调节单元控制结构

图6中,取各控制器典型值 $T_1=0.02$ 、 $K_{p1}=0.04$ 、 $K_{i1}=1600$,则负的单位阶跃信号输入条件下,该控制器的指令输入与输出关系仿真结果如图7所示。可以

看出低电压穿越控制下SVC无功电流响应速度时滞约为0.02 s。

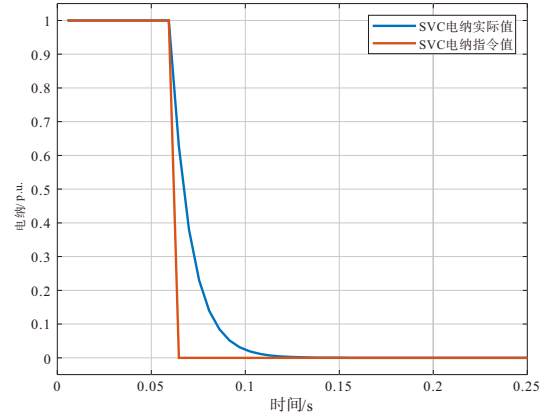


图7 SVC电纳指令值与输出

图7表明,SVC面临此类型故障电压时,会产生一定控制延时,使得无功错位补偿,进一步加剧故障恢复过程中的暂态过电压水平。因此,部分风电场的故障控制策略为切除SVC,防止电压过高引起风机脱网。

3 风电汇集系统暂态电压抑制策略

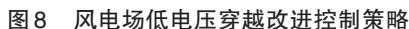
由以上分析可知,风电机组的无功电流支撑回撤滞后和SVC支路投切滞后是导致无功过剩、影响风电汇集系统故障恢复阶段暂态过电压水平的两大因素。

3.1 风电场低电压穿越控制策略改进

依据相关标准要求,风电场具备故障后无功电流支撑能力,式(8)中补偿系数 K 在1.5~3范围内可变。补偿系数 K 接近1.5,故障恢复阶段暂态过电压水平低,但此时风机无功支撑电流小,风电场PCC点电压跌落深度大,加剧机组脱网风险;补偿系数 K 接近3,能更有效地支撑故障后的电压跌落,但会进一步加剧过电压水平。

为了有效补偿故障期间先低后高的电压波形,文中提出一种变补偿系数的风电机组低电压穿越改进策略,即在故障发生初期,设定补偿系数为3,减小故障后的电压跌落深度;当检测到风电场PCC点电压高于0.5 p.u.且电压呈上升趋势时,设定补偿系数为1.5,在满足标准的前提下,尽量降低故障后风电场无功盈余量。

此控制策略如图8所示。



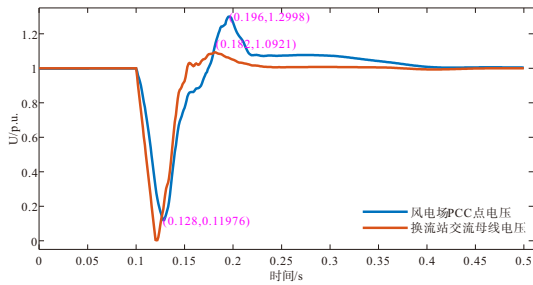
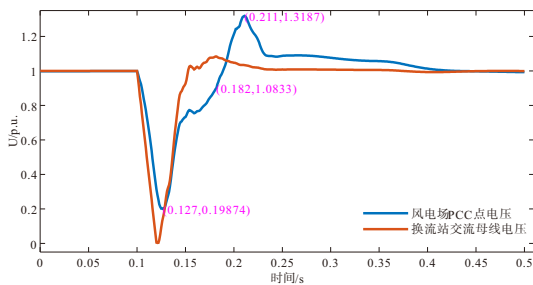


图 11 传统控制策略下关键节点电压波形图

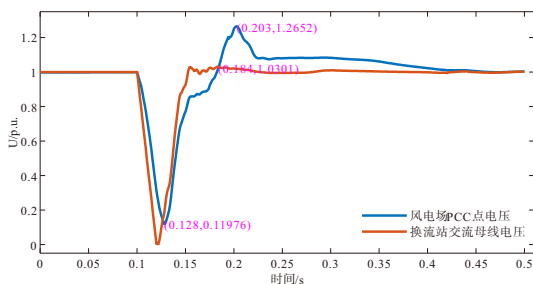
图中标定了风电场 PCC 点故障电压的峰谷值与送端换流站交流母线电压峰值。从图 11 可以看出,发生此类型故障后,风电场 PCC 点电压与送端换流站交流母线电压波形呈现先低后高的特点;暂态电压跌落速度快、暂态过电压水平高,容易诱发风电场发生高电压脱网事故,不利于电网的安全稳定运行。

4.2 设备动作时序方案有效性分析

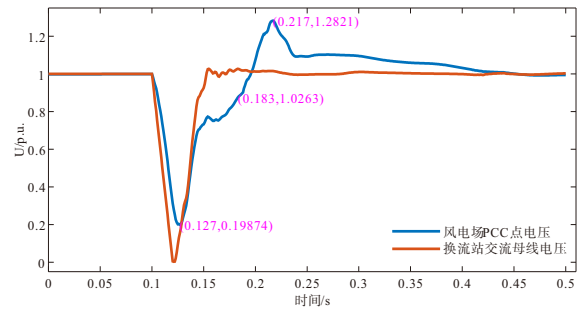
为验证文中所提风电场与 SVC 改进策略的有效性,在 4.1 节的基础上,设置三个仿真案例进行对比分析:1) 案例一:如 3.1 节所述,风电场采用低电压穿越改进控制策略,SVC 故障全程采用定电压控制模式;2) 案例二:如 3.2 节所述,SVC 使用改进支路控制策略,风电场维持原有低电压穿越策略不变;3) 案例三:如 3.3 节所述,风电场采用低电压穿越改进控制策略,SVC 使用改进支路控制策略。其他设置同 4.1 节所述,得到风电场 PCC 点电压与送端换流站交流母线电压如图 12 所示。



a) 案例一



b) 案例二



c) 案例三

图 12 改进控制策略下关键节点电压波形图

对比图 11 和图 12 a) 可知,对风电场 PCC 点电压而言,文中所提低电压穿越改进控制策略能减小故障后电压跌落深度、有效支撑电压,相较于传统低电压控制策略,故障后电压谷值提升约 65.95%;但由于故障前期增加了补偿系数,暂态过电压水平提升约 1.45%。对送端换流站交流母线电压而言,由于风电场与送端换流站电气距离较长,故低电压穿越改进控制策略影响甚微。

对比图 11 和图 12 b) 可知,对风电场 PCC 点电压而言,文中所提 SVC 改进支路控制策略影响甚微,也是由于电气距离较远的原因;对送端换流站交流母线电压而言,改进支路控制策略能减小 SVC 发出的盈余无功,有效抑制暂态过电压水平约 5.68%。

对比图 11 和图 12 c) 可知,综合了两种设备的改进控制策略,关键节点电压的控制效果得到进一步提升。文中所提多无功源改进控制策略能在低电压期间增发无功,使得风电场 PCC 点电压跌落深度减小 65.95%。同时,得益于 SVC 中 TCR 支路的投入和 TSC 支路的切出,PCC 点、换流站交流母线暂态过电压水平分别减小约 1.36% 和 6.02%。综合来看,案例三下的控制策略具有最优的控制效果。

5 结语

风电直流外送系统发生送端换流站近区交流三相接地故障后,风电场 PCC 点电压与送端换流站交流母线电压波形呈现先低后高的特点。电压跌落由接地故障造成,暂态过电压则是由于系统内多类型无功源支撑时序紊乱、无功回撤滞后造成的。故障恢复阶段的暂态过电压易造成风电机组高电压脱网,不利于故障恢复,更严重可能导致事故范围扩大,影响电

网安全稳定运行。

因此,文中提出一种考虑风电场和SVC无功回撤不及时时序动作策略,即在电压恢复阶段减小风电场无功支撑电流补偿系数,以最大触发角投入TSC支路、切除TCR支路,在故障电压回到稳定范围后恢复SVC正常控制模式。该策略能缓解多无功源支撑无功回撤滞后问题,根据关键节点电压提供动态无功支撑。仿真结果表明,所提控制策略能有效减小此类故障下的电压跌落深度,控制暂态过电压水平,降低了风电机组因故障电压脱网的风险。

参考文献:

- [1] 贺静波,庄伟,许涛,等.暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J].电网技术,2016,40(06):1839-1844.
- [2] 杜维柱,罗亚洲,李蕴红,等.风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(09):3224-3239.
- [3] 李帛洋,晁璞璞,徐式蕴,等.风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J].电力自动化设备,2022,42(03):26-35.
- [4] 贾俊川,金一丁,赵兵,等.风机低电压穿越控制对系统暂态过电压的影响及优化[J].电网技术,2021,45(02):526-533.
- [5] 窦宇宇,黄宇辰,刘志强,等.风电机组低电压过渡控制对暂态频率及过电压的影响及优化[J].内蒙古电力技术,2022,40(04):33-40.
- [6] 李欣悦,李凤婷,尹纯亚,等.直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(01):1-8.
- [7] 孙大卫,吴林林,刘辉,等.弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4777-4786.
- [8] 王熙纯,刘纯,林伟芳,等.风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J].电网技术,2021,45(12):4612-4621.
- [9] 周莹坤,谢恒,孙华东,等.新能源机组低电压穿越控制参数对机端工频过电压的影响[J].电网技术,2022,46(05):1907-1916.
- [10] 林伟芳,任晓钰,张桂红,等.考虑功角稳定和暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J].电网技术,2023,47(04):1323-1331.
- [11] Li Y, Zeng Y, Zhang W, et al. Coordinated optimization method for suppressing transient overvoltage caused by HVDC commutation failure considering large wind power integration[J].Energy Reports, 2023(09):1171-1182.
- [12] 郑超.SVC错位补偿对风机高电压脱网威胁及应对措施[J].电网技术,2016,40(09):2750-2757.
- [13] 李志,韩颖,李岩松,等.换相失败下直流送端SVC无功反调机理分析及控制策略研究[J].电测与仪表,2022,59(09):153-159.
- [14] Jin X, Nian H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVdc system under commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(09):10265-10277.
- [15] 赵博元,路晨,陈磊,等.锁相环动态对切换延迟导致的VSC暂态过电压的影响[J].电网技术,2025,49(01):284-294.
- [16] 骆舒婕,陈磊,赵博元,等.考虑锁相环动态的VSC暂态过电压解析计算与参数影响分析[J].电力系统自动化,2025,49(11):168-177.
- [17] Liu J, Jiang R, Liu Q, et al. Study on transient overvoltage of wind farm caused by fault of HVDC system and its suppression measures[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).IEEE, 2018:1-6.
- [18] Li Y, Guo J, Zhang X, et al. Over-voltage suppression methods for the MMC-VSC-HVDC wind farm integration system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019,67(02):355-359.
- [19] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电:GB/T 19963.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [20] 何国庆,王伟胜,刘纯,等.风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(一):送端风电机组暂态无功电压建模[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4391-4405.