

[海上风电]

基于 VSC-HVDC 海上风电场低电压穿越技术的协调控制

文/ 海洋石油工程股份有限公司 唐 怡 蒋志鹏 徐建东 王海云 张天仪

提出了一种基于超级电容的动态电压恢复器 (SC-DVR)、耗能电阻 (DBR)、改进的网侧变流器无功补偿策略相互配合的控制方法。该方法根据电网电压跌落的深度,依次投入 SC 和 DBR 来吸收风电场输出功率与电网吸收的功率差值,同时通过 DVR 快速补偿电网故障电压,使风电场交流母线电压始终维持正常水平。

海上风电具有风资源丰富、靠近电力负荷中心、环境保护和节约用地等方面的优势,因此具有很大的市场前景。随着海上风电场容量的不断扩大,交流并网方式已经受到了多方面的制约,基于 VSC 的 HVDC 系统具有控制灵活、损耗低、调度方便和有功无功独立控制等特点,使得 VSC-HVDC 输电技术成为国内外大型远距离海上风电场并网的最好选择。

海上风电场的大规模接入导致电力系统对风电并网提出了更加严格的要求,其中 LVRT (并网风机在电网出现电压跌落时仍保持不脱网的运行方式) 是风电场设计上的最大挑战。由于电网电压跌落深度的不同,同时又存在电力电子器件等容量限制,单纯地改进无功补偿策略并不能完全补偿跌落电压,因此将 SC-DVR 应用于风电并网的电网电压跌落故障中具有一定的优势。

DVR 是目前改善动态电能质量提高低电压穿越能力最有效、最快速的装置。借助 STATCOM 无功补偿装置可以为电网提供无功支撑,但该方案不能很好地平抑有功功率波动。MCC-HVDC 联网风电场的 LVRT,模块化多

电平技术能够使 SVC-HVDC 适用于高压场合,但是未对直流侧采取相应的保护措施,大部分能量将存储于直流母线电容中,严重时会导致整个发电系统瘫痪。在直流侧采用 Crowbar 电路。当电网电压跌落时,风机能够保持正常运行,但是直流侧的多余能量被电阻消耗,浪费了资源。在风电场公共连接点串联 MMC-DVR 来克服逐台风机 LVRT 的改造,可以集中实现低电压穿越技术。

本文在应用 MMC 技术的基础上,针对电网电压的深度跌落,提出了 SC-DVR 和耗能电阻相互配合切入的海上风电场低电压穿越方法。该方法首先利用超级电容吸收直流侧过剩的能量,随后通过 SC-DVR 补偿岸上风电场端口电压,保证了交流母线电压的正常;当 SC 吸收的有功功率达到其设计的最大功率时,切入 DVR 侧并联的 DBR,吸收直流侧剩余的能量,此方法既稳定了直流侧母线电压,又提高了系统的能量利用率,实现了智能电网的优化设计。在 Matlab/Simulink 中搭建了风电场 VSC-HVDC 系统模型和 SC-DVR 模型,分别进行了浅度和深度低电压穿越仿真,验证了该策略的可行性。

系统结构

1. 所提策略的拓扑结构

DFIG 海上风电场 VSC-HVDC 系统结构如图 1 所示,在传统的 VSC-HVDC 海上风电拓扑基础之上,该模型在直流侧通过直交直降压隔离模块并入 SC-DVR,经过串联变压器接入 T2 的低压侧。电网正常运行时,DVR 处于旁路备用状态;电网电压跌落一定深度时,S 开关闭合,将直流侧过剩的能量吸收,同时产生补偿电压维持 PCC2 电压稳定。

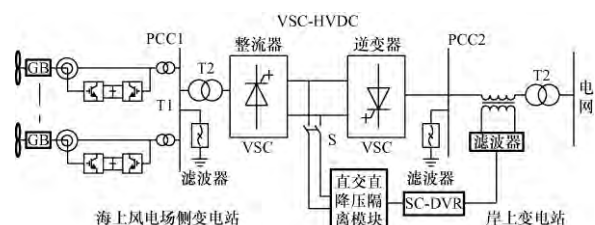


图 1 DFIG 海上风电场 VSC-HVDC 系统拓扑

VSC 三相简化等效电路拓扑如图 2 所示, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 和 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 分别为三相交流母线电压和电流的基波分量; L 、 R 分别为 VSC 换流电抗器的等效电感和电阻; S_k 为开关函数,当 $S_k=1$ 时,上桥臂开通,下桥臂关断;当 $S_k=0$ 时,下桥臂开通上桥臂关断。令 $K=(a, b, c)$ 。

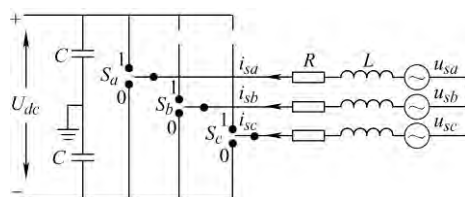


图 2 VSC 三相简化等效电路拓扑

将三相静止坐标系下的正弦交流量转换成同步旋转坐标系下的 d 、 q 直流分量的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + R i_d = u_d - S_d U_{dc} \\ L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + R i_q = u_q - S_q U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

2. 基于超级电容单元的 DVR 结构

基于超级电容的 DVR 电路图如图 3 所示, S 为静态开关将直流侧与 DVR 隔离;直交直降压隔离模块由逆变器、变压器和整流器组成; SC-DVR 由超级电容 SC、Bi-DC/DC、耗能电阻、VSC 逆变器、LC 滤波器和串联变压器组成。

当发生电压跌落且直流电压外环已不能保证直流侧电压稳定时, S 开关闭合,切入 DVR,将多余的能量

由超级电容吸收,经过 Bi-DC/DC 为 VSC 提供稳定的直流电压,最后经 LC 滤波、串联变压器补偿 PCC2 跌落电压,既维持交流母线电压稳定又保护了直流侧电容,同时充分利用了资源。若风电场发出的功率与电网吸收功率差完全由 SC 吸收,那么所需 SC 的容量非常大,进而增加了成本,所以在 SC 侧并联耗能电阻,消耗 SC 吸收不了的能量,稳定直流侧电压。

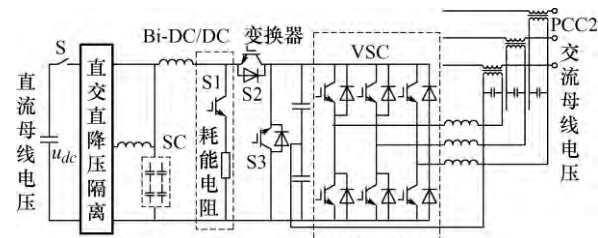


图 3 基于超级电容的 DVR 电路图

电网电压浅度跌落的 VSC-HVDC 无功补偿策略

当电网稳定运行时,风电场侧整流器采用定有功功率控制,实现了风电场到电网有功功率的最大传输;网侧逆变器采用定直流电压控制。当电网电压浅度跌落时,整流器控制策略不变;逆变器转换为无功补偿模式,对跌落电压进行补偿,对改进的网侧 VSC 控制策略进行说明。

电网侧 SVC 控制器如图 4 所示,直流母线电压 u_{dc} 与其参考值 u_{dc}^* 的偏差经 PI 调节器得到有功电流参考值 i_d^* ;无功参考电流 i_q^* 直接由电网电压有效值 $\sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$ 与其参考值 $U\sqrt{2}$ 作差经 PI 调解器得到; u_{sd} 和 u_{sq} 、 i_{sd} 和 i_{sq} 分别为交流系统电压和电流在 d 、 q 轴的分量;通过解耦运算得到电压的给定值 u_{rd} 和 u_{rq} ,送入 SPWM 发生器。此控制策略既有效抑制了直流侧电压的波动,又为 PCC2 点提供无功支持。

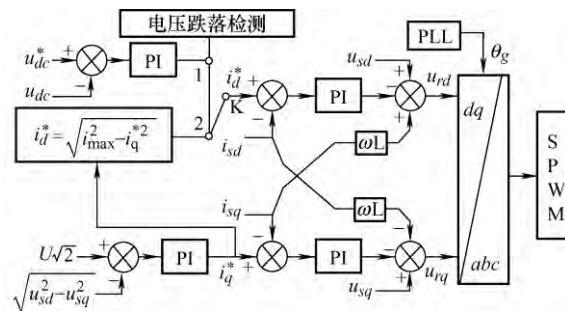


图 4 电网侧 SVC 控制器

在电网稳定运行和浅度跌落情况下,开关 K 都处于 1 状态。当电网电压继续降低会限制逆变器的无功补偿能力,即使对控制策略进行改进也只适用于电压的浅度跌落,故在电网电压深度跌落时,需要添加动态电压恢复器实现 LVRT。

SC-DVR 控制策略

1. 动态电压复合控制模式

图 5 为单相 DVR 等效电路, u_{sag} 为电网跌落后电压, u_D 为 DVR 输出补偿电压, u_{PCC2} 为交流母线接入点电压, u_{in} 为 DVR 的逆变器输出电压, i_L 为母线电流, i_f 为滤波电感电流, i_c 为滤波电容电流, L_f 、 C_f 为滤波电感和电容, r_f 线路阻抗和逆变器等效电阻之和。

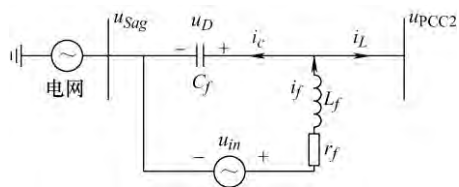


图 5 单相 DVR 等效电路图

由图 5 可得 DVR 的状态方程

$$\begin{cases} u_{PCC2} = u_{sag} + u_D \\ i_f = i_c + i_L \\ i_c = C_f \frac{du_D}{dt} \\ u_{in} = u_D + r_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

动态电压恢复器的复合控制采用前馈补偿+外环 PCC2 点电压瞬时值反馈+内环滤波电容电流反馈的方式。前馈控制具有很高的动态响应速度,控制简单;反馈控制可提高系统的稳定性和动态性能。复合控制结合了二者的优点。控制策略如图 6 所示,图中 U_{PCC2}^* 为交流母线参考电压。

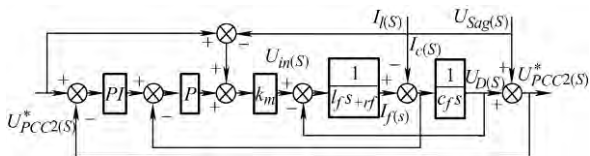


图 6 DVR 复合控制框图

2. 超级电容和耗能电阻的能量约束

当 SC 投入运行时,可能导致 SC 过度充放电,过

充电会影响 SC 的使用寿命,根据能量管理思想保证 SC 的端电压在合理范围内:当 $v_{SC} > v_{SC-max}$ 时,SC 不再吸收功率,此时 S3 闭合,将直流侧未被吸收完的功率由耗能电阻消耗,保证 SC 不过充电的同时减小 SC 的功率和容量的设计,提高了系统的经济性。统计表明,沿海电力用户低电压故障介于 50%~80% 的骤降年发生率在 20 次左右,同时考虑到 SC 的串并联、变换器最优工作状态等,设 SC-DVR 在故障期间吸收或输出的最大有功功率和最高充电电压及最低放电电压分别为 $P_{DVR-max}$ 、 v_{SC-max} 和 v_{SC-min} 。为保证 SC 充放电能量平衡,根据式(3)对 SC 额定电压 v_{SC-ref} 进行设定

$$v_{SC-ref} = \sqrt{\frac{v_{SC-max}^2 + v_{SC-min}^2}{2}} \quad (3)$$

由于单体 SC 为 2.7V/2400F,将 SC 应用于高压输电时,需要对 SC 进行储能阵列扩容。又因为 SC 的串并联数量庞大,有必要对其进行优化设计,可提高 SC 的使用效率,降低 SC 的成本、体积。

W_s 为 SC 储能阵列在理想情况下存储的能量表示为

$$W_s = \frac{1}{2} mn C_{SC} (U_{C0}^2 - U_{C1}^2) \quad (4)$$

式中, m 是 SC 的串联个数, n 是 SC 并联组数, C_{SC} 、 U_{C0} 是单体 SC 的额定电容量和电压, U_{C1} 是最低工作电压。根据式(5)可知,电容器个数满足如下条件

$$mn = \frac{2W_s}{C_{SC} (U_{C0}^2 - U_{C1}^2)} \quad (5)$$

因为

$$m U_{C0} = \sqrt{C_r} \quad (6)$$

且 m 、 n 还要满足如下条件

$$C_s = \frac{n}{m} C_{SC} \quad (7)$$

实际工程中, m 、 n 、 mn 均为整数,根据式(7)对 SC 阵列进行扩容,此法简单,易于理解。

当 SC 阵列吸收功率已经达到最大功率 $P_{DVR-max}$ 时, S3 开关闭合,耗能电阻投入使用,满足如下关系

$$P_{gen} - P_{grid} = P_{dc} \geq P_{DVR-max} \quad (8)$$

$$P_{DVR-max} = \frac{1}{2} mn C_{SC} v_{DVR-max}^2 \quad (9)$$

$$P_{grid} = \dot{V}_{g+} P_{gen} \quad (10)$$

故

$$P_{dc} = (1 - \dot{V}_{g+}) P_g \quad (11)$$

式中, P_{gen} 是 SVC-HVDC 输送到电网的有功功率; P_{dc} 是故障期间直流侧存储的有功功率; P_{grid} 是故障期间电网有功功率; $\dot{V}_{g+}$ 是故障电压正序分量标幺值; P_{R_s} 是耗能电阻吸收的有功功率。

为了稳定直流侧电压, 将多余的能量由耗能电阻 R_s 消耗, 根据功率平衡

$$P_{R_s} = P_{dc} - P_{DVR-max} = \frac{v_{DVR-ref}^2}{R_s} \quad (12)$$

将式 (9)、式 (11) 代入式 (12), 可得耗能电阻取值为

$$R_s = \frac{2v_{DVR-ref}^2}{2(1-\dot{V}_{g+})P_{gen} - mnC_{SC}v_{DVR-max}^2} \quad (13)$$

协调控制策略

针对电网电压深度跌落, 本文提出了一种 VSC-HVDC、SC-DVR 和耗能电阻协调配合的控制策略, 此策略根据电网电压跌落深度来切入直流侧 DVR 电路, 即仅当电压外环不能维持直流侧稳定时, 网侧 VSC-HVDC 的有功电流的开关 K 切换 2 位置 (见图 4), 同时投入 SC-DVR 控制直流侧电压。图 7 为故障条件下协调控制逻辑框图。

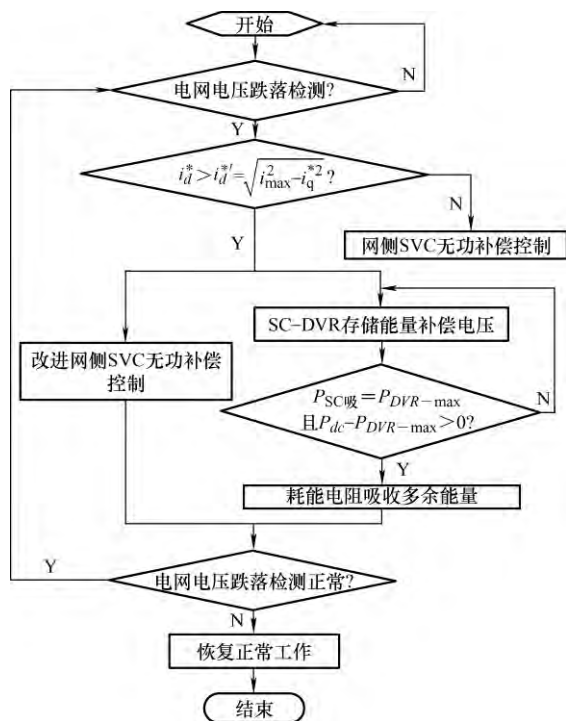


图 7 系统低电压穿越控制逻辑

当电网无故障时, 电网侧 VSC 的无功电流的给定值为零, 系统运行于功率因数为 1 的状态下; 当电网电压发生轻度跌落时, i_q^* 不为零, 此时电网侧 VSC 运行于无功补偿模式; 当网侧电压深度跌落时, 通过 $i_d^{*'} = \sqrt{i_{max}^2 - i_q^{*2}}$ 对有功参考电流进行限制, 有效抑制了电网侧 VSC 切换工作状态时而引起的直流侧电压的波动。当 $i_d^* \leq i_d^{*'}$ 时, 此时 SC-DVR 不投入运行; 当 $i_d^* > i_d^{*'}$ 时, 电压外环已经不能控制 u_{dc} , 投入 SC-DVR 吸收直流侧多余能量补偿交流母线电压是最好的选择, 并将直流侧电压由 SC-DVR 控制, 保证 u_{dc} 保持在稳定范围内。当 $P_{dc} > P_{DVR-max}$ 且 SC 吸收的能量 $P_{SC吸} = P_{DVR-max}$ 时, 投入耗能电阻吸收额外的能量, 缓解 DVR 的容量压力。本控制策略通过合理的控制使整个系统能够处于 DVR 和耗能电阻的保护范围内的同时, 最大限度地稳定直流电压, 保持交流母线电压的恒定。

仿真验证

在 Matlab 仿真环境中搭建模型, 具体参数为: 风电场额定容量为 200 MW, 由 40 台 5 MW 双馈风力发电机组组成, 输出线电压有效值为 690 V; 直流侧电压额定值为 ± 100 kV, 网侧滤波电感为 62.23 mH, 换流电抗器为 23.88 mH, 直流侧电容 80 μ F, 直流线路长度设置为 100 km; 功率器件为 IGBT, 开关频率为 1 350 Hz; 交流电压有效值为 110 kV, 频率设定为 50 Hz; 以系统容量 200 MV·A、直流侧额定电压 100 kV 对系统进行标幺化; 直流电压外环 PI 控制器参数为 $k_p=2$, $k_i=40$, 网侧 VSC 电流内环 PI 调节器参数为 $k_p=3.0$, $k_i=3.0$; 超级电容阵列的额定工作电压为 2 kV, 最低工作电压为 1 kV, 等效电容量为 68 F, 最大吸收功率为 100 MW, 串联电容数 n 为 741 个, 并联电容数 m 为 21 个; 耗能电阻阻值为 25 Ω 。

故障设置: ①电网侧在 2 s 时发生电压跌落 (以 a 相为例), 电压降为额定电压的 80%, 故障维持 0.3 s, 仿真波形如图 8 所示; ②当风电场接近满发时, 电网电压降为额定值的 20% (以 a 相为例), 故障维持 0.3 s, 即 2.3 s 时故障消除, 仿真波形如图 9 所示。

当电网电压轻度跌落时, 网侧 VSC 运行于 STATCOM 模式, 不投入 DVR 和 DBR。从图 8b 中可以

看到 2~2.3 s 电网电压跌落时, 直流侧电压的波动得到了较好的抑制, 维持在 2p.u. 图 8c 中无功功率由原来的 0 变为 0.2p.u.。图 8d 中有功功率维持在 1 p.u., 保证故障期间直流系统的功率平衡。图 8e 中 PCC2 点的公共母线电压在故障期间基本维持与故障前电压相同。仿真表明: 在电网发生瞬间跌落且直流电压外环能保证直流侧电压稳定时, 网侧变流器运行在无功补偿模式, 并且依据电网跌落深度来发出无功电流, 有助于保持电网电压稳定, 提高了风电系统低电压穿越能力。

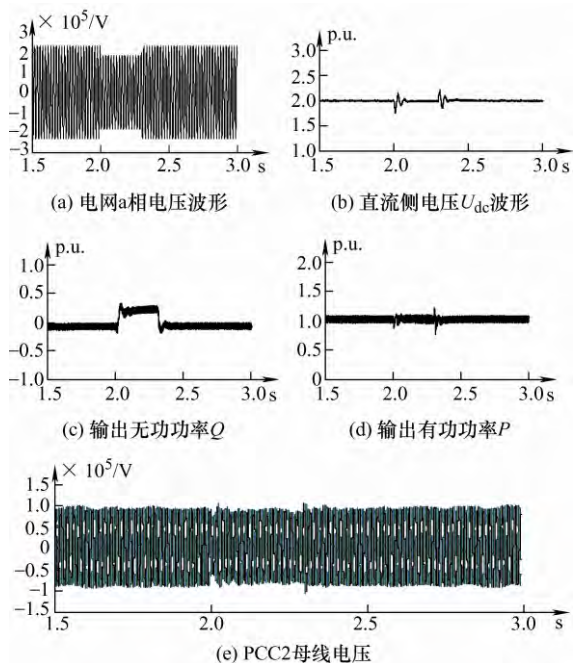


图 8 电网电压跌落 20%, 网侧变流器运行在 STATCOM 模式时系统仿真波形

当电网电压跌落额定电压的 80%时, 采用协调控制策略。如图 9c 和图 9d 可看出, 根据 SC 的能量管理可知: 在 2.2 s 左右 SC 阵列电压从最低电压 1 kV 开始增大, 达到最大限制值 2 kV 时, 其吸收功率开始受到制约 (由 0.5 p.u.开始下降), 此时投入耗能电阻吸收剩余的 0.3 p.u.如图 9e 所示, 当 2.3 s 故障切除时, DVR 和耗能电阻从电路中断开; 如图 9b 和 9g 所示, 此协调控制策略基本维持了直流电压和 PCC2 点母线电压的稳定, 使其不受电网故障的影响, 虽然有一定的波动和尖峰, 但都是在许可范围之内; 图 9f 中风电场机侧出口有功功率始终维持在 1 p.u., 表明海上风机与电网故障完全隔离, 即在故障期

间, 风电场正常稳定运行。

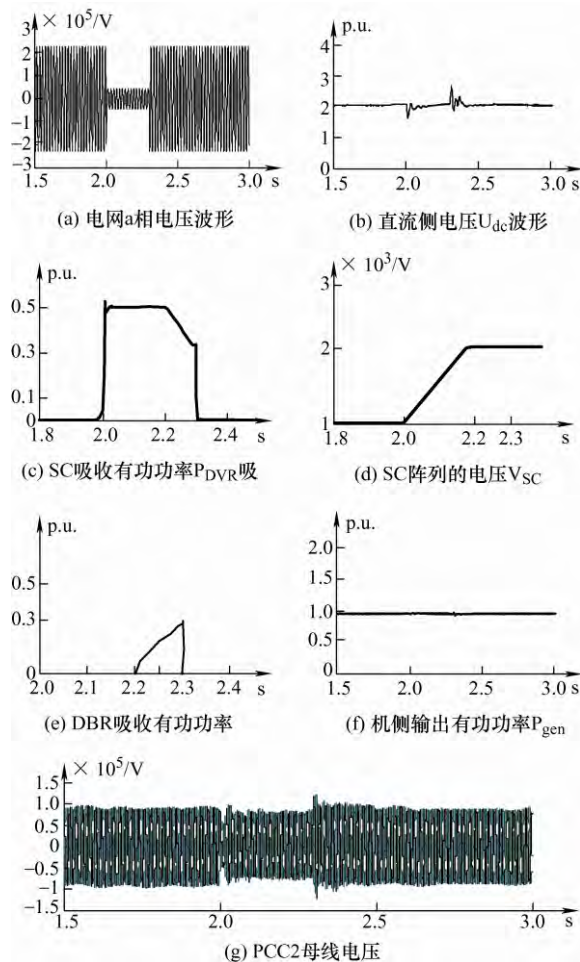


图 9 电网电压跌落 80%, 网侧变流器运行在改进控制策略模式时系统仿真波形

结束语

本文推导了故障期间 VSC-HVDC 和 DVR 的数学模型并设计出相应的控制策略。针对电网电压不同的跌落深度, 采用分阶段协调控制方案: 当有功参考电流小于限制值时, 采用网侧 VSC-HVDC 无功补偿模式; 当其大于限制值时, 投入 SC-DVR; 当 SC 达到其最大充电电压时, 不再对 SC 继续充电, 切入耗能电阻消耗直流侧剩余能量。本文设计出的 LVRT 协调控制方案不仅能将风电场和电网故障隔离, 还可保持岸上风电场交流母线电压和 VSC-HVDC 直流侧电压正常, 辅助风电场完成 LVRT。EA

(收稿日期: 2020.12.09)