

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250306

兼顾电压支撑的 V2G 充电站自适应故障穿越控制方法

尹栋^{1,2}, 欧阳金鑫¹, 李昂^{1,2}, 王建¹, 赵信哲¹

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司市南供电分公司, 重庆 401336)

摘要: 车网互动(vehicle to grid, V2G)模式的充电站可为电网运行提供有效支持。但在电网故障下, 直流侧不平衡功率可能使得充电站直流电压越限, 造成充电站被从电网切除。直接切除使充电站无法在故障期间为电网提供支撑, 并导致短时间内启停而危害站内电力电子器件。为此, 刻画了避免直流电压与交流电流越限的充电站功率边界, 建立了计及故障持续时间的充电站故障穿越功率可行域。分析发现了故障穿越功率可行域随故障持续时间增加而缩减的特征, 提出了避免充电站直流电压越限的极限故障时间计算方法。并解析了避免交流电流与直流电压越限的充电站最大电压支撑点。通过考虑极限故障时间与电网保护动作时间的关系, 提出了兼顾电压支撑的充电站自适应故障穿越控制方法。仿真验证表明, 该方法能够根据不同故障严重程度采取应对措施, 在保障充电站安全的同时最大程度支撑并网点电压。

关键词: 电动汽车充电站; 放电模式; 故障穿越; 电压支撑; 功率可行域

Adaptive fault ride-through control method for V2G charging stations with voltage support capability

YIN Dong^{1,2}, OUYANG Jinxin¹, LI Ang^{1,2}, WANG Jian¹, ZHAO Xinzhe¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Shinan Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401336, China)

Abstract: Charging stations operating in the vehicle-to-grid (V2G) mode can provide effective support for power system operation. However, under grid fault conditions, unbalanced power on the DC side may cause the DC voltage of the charging station to exceed its limits, leading to the disconnection of the charging station from the grid. However, direct disconnection prevents the charging station from supporting the grid during faults and may result in frequent short-term start-stop operations, thereby endangering the power electronic devices within the charging station. To address this issue, the power boundaries of charging stations that avoid DC voltage and AC current limit violations are characterized, and a fault ride-through power feasible region considering fault duration is established. The analysis reveals that the fault ride-through power feasible region shrinks as the fault duration increases, and a method for calculating the critical fault duration that avoids DC voltage limit violations is proposed. Furthermore, the maximum voltage support point of the charging station that avoids AC current and DC voltage limit violations is analytically derived. By considering the relationship between the critical fault duration and grid protection action times, an adaptive fault ride-through control method of charging stations with voltage support capability is proposed. Simulation results show that the proposed method can adopt to different fault conditions, ensuring charging station safety while maximizing voltage support at the point of common coupling.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2406800).

Key words: electric vehicle charging station; V2G; fault ride-through; voltage support; power feasible region

0 引言

电动汽车充电站可采用车网互动(vehicle to grid,

V2G)放电运行模式为电网提供支持^[1-3], 因而在电网运行控制领域受到广泛关注。充电站内电动汽车一般通过电压源变换器(voltage source converter, VSC)与双有源主动桥式变换器(dual active bridge, DAB)两级式结构接入电网^[4-5]。在电网短路故障下, 通过VSC的灵活控制, V2G充电站能够输出无功功率支撑电网电压。但是, 电网故障后充电站并网点电压

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2023YFB2406800); 国网重庆市电力公司市南分公司科技项目资助(SGCQSN00YJJS2400426)

跌落,可能使得充电站的输出有功功率因VSC电流限幅而减小,充电站直流侧产生不平衡功率,导致直流电压上升。直流电压过高可能导致直流母线电容发生爆炸等安全问题^[6-7]。

目前,电网故障条件下充电站一般通过触发交流侧低电压保护直接脱网,直至电压恢复后再重新并网^[8]。但直接脱网使得充电站在故障持续期间无法为电网提供支撑,并且由于电网故障持续时间很短,短时间内启停将损害充电站内电力电子器件,增加充电站运行与维护成本。充电站的结构与新能源系统结构相似。新能源故障穿越已有较多研究,主要是利用附加储能装置^[9-10]、超级电容^[11]、卸荷^[12-13]等方式避免直流电压越限的条件下通过变流器控制输出无功功率支撑电网。附加储能、超级电容建设成本与运维费用较高,不适合在已经建成的充电站大面积推广。卸荷以耗散直流母线电容中的盈余能量避免直流过电压的产生,但在大功率放电场景下卸荷投切会在充电站中产生大量热量,引发火灾等安全隐患。并且卸荷投切过程中将会引发暂态电流冲击,对电力电子器件造成影响^[14]。

在电网故障期间电压跌落严重,为了避免充电站脱网并改善故障特性,电力电子设备常被要求发出无功功率以支撑电压。然而,中低压配电网中,系统呈现阻感性^[15],不能仅靠输出无功功率支撑电压。文献[16]根据线路阻抗比分配有功电流和无功电流。文献[17]通过拉格朗日乘数法整定了有功电流和无功电流参考值。文献[18-19]在并网变流器输出受限时,根据阻抗比分配电流各分量,仿真验证了并网点电压支撑效果相较于无功优先策略更优。但是,上述策略基于卸荷等附加装置抑制直流过电压,忽略了直流电压与有功功率的关系。V2G充电站的故障穿越尚难以兼顾直流电压越限、交流电流越限以及最大程度支撑并网点电压。

本文针对V2G充电站故障穿越展开研究,分析了两级式变流器控制下V2G充电站的直流电压暂态过程,建立了交流电流限制下避免直流电压越限的充电站故障穿越功率可行域,提出了避免直流电压越限的极限故障时间的概念与计算方法;根据并网点电压关于充电站有功与无功功率的关系,解析了充电站最大电压支撑点处于故障穿越功率可行域边界的特征;考虑故障切除时间与极限故障时间的大小关系,提出了兼顾电压支撑的充电站自适应故障穿越控制方法,在确保充电站直流电压和交流电流安全的同时最大限度支撑并网点电压。

1 充电站故障穿越功率可行域建模

电动汽车充电站通常将整流功能集中于1台VSC,每台电动汽车通过单独的DAB连接至同一直流电容。在V2G运行模式下,电网调度中心以负荷曲线波动最小、电力传输损耗最小等为目标制定充电站的放电功率参考值^[20]。充电站内功率分配控制器结合每台电动汽车的荷电状态、用户意愿和充电站放电功率参考值,将放电功率参考值实时分配给各DAB,从而控制电动汽车发出相应的实时功率,如图1所示。第*i*台电动汽车的放电功率参考值 P_{bar}^* 可表示为^[21]

$$P_{\text{bar}}^* = \frac{U_{\text{bar}} Q_i (S_{\text{OC}}^i - S_{\text{OC}}^{i,\text{min}})}{\sum_{i=1}^N U_{\text{bar}} Q_i (S_{\text{OC}}^i - S_{\text{OC}}^{i,\text{min}})} P_s^* \quad (1)$$

式中: U_{bar} 为第*i*台电动汽车电池端电压; Q_i 为第*i*台电动汽车电池容量; S_{OC}^i 、 $S_{\text{OC}}^{i,\text{min}}$ 分别为第*i*台电动汽车的实时电池荷电状态与最低允许荷电状态; N 为充电站内处于放电状态的电动汽车数量; P_s^* 为充电站放电功率参考值。

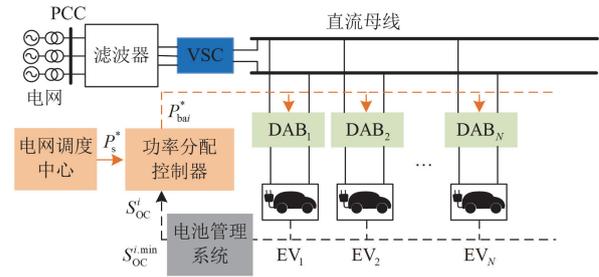


图1 电动汽车充电站拓扑

Fig. 1 Topology of electric vehicle charging station

电动汽车的DAB放电功率参考值与电池实时放电功率比较后经PI环节输出移相比 D ,并采用单移相控制,使得电池输出给定的功率。VSC通常采用电网 d 轴电压定向的矢量控制。通过定直流电压控制维持直流电压,从而跟踪电池输出的功率。同时,通过VSC无功功率控制使得电动汽车输出给定无功功率。电网故障下,VSC输出功率可写为^[22]

$$\begin{cases} P_g = u_{\text{pcc}} i_d \\ Q_g = -u_{\text{pcc}} i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_g 、 Q_g 分别为VSC的有功功率和无功功率; u_{pcc} 为充电站并网点电压; i_d 、 i_q 分别为VSC的 d 、 q 轴电流。

电网发生短路故障后,充电站并网点电压跌落,VSC有功功率在故障瞬间骤跌,导致直流侧电容功

率过剩，直流电压升高。在直流电压控制下，VSC的d轴电流升高，进而有功功率升高。然而，受限于变流器容量，充电站VSC交流电流不能超过最大允许电流。根据瞬时功率理论，故障下VSC的有功与无功功率满足

$$P_{g,f}^2 + Q_{g,f}^2 \leq (U_0 K_1 I_N)^2 \quad (3)$$

式中： $P_{g,f}$ 、 $Q_{g,f}$ 分别为故障下VSC输出的有功与无功功率； K_1 为VSC最大允许交流电流系数； I_N 为VSC额定交流电流； U_0 为故障瞬间并网点电压幅值。

当电网故障轻微时，充电站并网点电压跌落较小，在直流电压控制作用下，VSC有功功率可能恢复至故障前的大小，使得直流电容两侧功率迅速平衡，直流电压不会越限^[23]。但是，当电网故障严重，充电站并网点电压跌落较大时，由于VSC交流电流限幅的影响，直流电压持续上升，可能导致充电站直流电压越上限，直流母线电容面临爆炸等风险。根据电容充电方程，可得故障期间避免直流电压越限的VSC有功功率满足

$$\int_{t_0}^{t_0+T} (P_{s,f} - P_{g,f}) dt \leq \frac{1}{2} C (U_{dc,lim}^2 - U_{dc}^{*2}) \quad (4)$$

式中： t_0 为故障发生时刻； T 为故障持续时间； U_{dc}^* 为直流电压参考值； C 为电容； $U_{dc,lim}$ 为直流电压上限，为避免避免通信延迟等因素影响，在实际系统中直流电压上限可取实际值的90%； $P_{s,f}$ 为故障下充电站内电动汽车放电总功率。

VSC控制器响应速度迅速，可近似认为有功功率无差跟踪控制参考值^[24]。DAB的控制时间尺度远小于直流电压变化的时间尺度，且DAB具有宽电压运行的特性，使得DAB的传输功率在直流电压变化下能够跟随功率参考值。此外，电网故障持续时间很短，在故障期间电池荷电状态与充电站放电功率参考值不变。因此，充电站内电动汽车放电总功率在故障期间可视为不变，求解式(4)可得

$$P_{g,f} \geq P_{s,f} - \frac{C(U_{dc,lim}^2 - U_{dc}^{*2})}{2T} \quad (5)$$

式(3)与式(5)分别刻画了电网故障期间交流电流与直流电压限制下充电站有功与无功功率的可行范围。式(3)取等的VSC有功与无功功率刚好满足最大交流电流限制，若VSC有功或无功功率进一步增大，交流电流超过最大允许值。恰好满足最大允许交流电流的VSC有功与无功功率组合构成了充电站功率可行范围的上边界。式(5)取等的VSC故障下有功功率为刚好使得故障切除时刻充电站直流

电压达到上限。当VSC有功功率低于式(3)取等的有功功率时，故障切除时刻充电站直流电压将越限，即恰好满足直流电压限制的VSC有功功率构成了充电站有功功率可行范围的下边界。式(3)与式(5)的交集是电网故障下充电站直流电压与交流电流不越限，即能够确保充电站不间断运行的有功与无功功率范围，定义为放电模式的充电站故障穿越功率可行域。

充电站的故障穿越功率可行域如图2阴影部分所示。红色实线圆为故障下式(3)取等时的充电站的功率范围上边界，蓝色实线为式(5)取等时的VSC有功功率的下边界。交流电流约束下的VSC功率上边界与充电站并网点电压有关。电网故障后，交流电流约束下的VSC功率上边界减小。并网点电压越小，VSC功率上边界也越小。如图2所示，红色虚线圆与红色实线圆分别为并网点电压正常和跌落时的VSC功率上边界，并网点电压跌落后VSC功率上边界缩小。

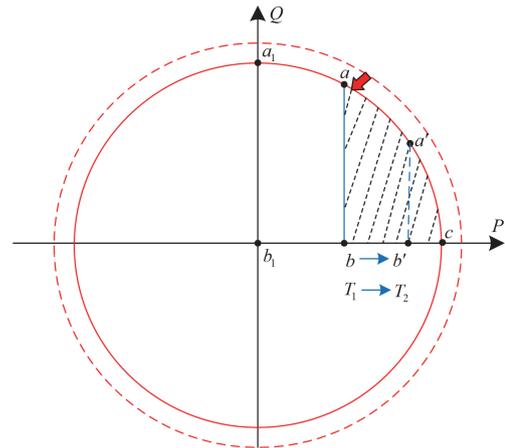


图2 充电站故障穿越功率可行域

Fig. 2 Power feasible region during fault ride-through of charging station

VSC有功功率下边界与故障持续时间有关。故障持续时间越长，VSC有功功率下边界的值越大。随着故障持续，故障穿越功率可行域不断减少。如图2所示，蓝色实线和虚线分别为故障时间为 T_1 和 T_2 时的有功功率下边界。随着故障持续时间增加至 T_2 ，故障穿越功率可行域由区域 abc 减小至区域 $a'b'c$ 。若有功功率下边界刚好与交流电流限幅的上边界相切时，故障穿越功率可行域存在唯一切点。若故障持续时间大于切点所对应故障持续时间时，直流电压必然越限，即仅依靠调节VSC有功和无功功率无法实现充电站故障穿越。因此，将切点对应故障持续时间定义为充电站穿越的极限故障时间。

联立式(3)与式(5), 极限故障时间可写为

$$T_{\max} = \frac{C(U_{\text{dc,lim}}^2 - U_{\text{dc}}^{*2})}{2P_{\text{s,f}} - 2U_{\text{f}}K_{\text{I}}I_{\text{N}}} \quad (6)$$

2 基于功率可行域的充电站电压支撑特性

充电站接入电网的等效电路如图 3 所示。

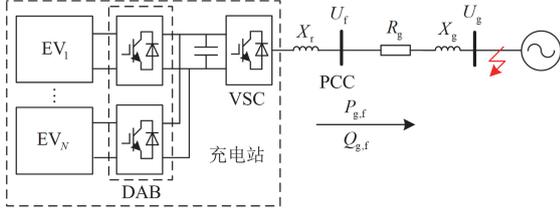


图 3 充电站接入电网等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of charging station connected to grid

其中, 等效阻抗 R_f 与 X_f 包括变压器等效电抗、输电线路阻抗和电网等效阻抗。配电网的阻抗比较大, 不能忽略有功功率对并网点电压幅值的影响。充电站并网点与电网等效电压之间的电压降落可由充电站有功和无功功率表示为

$$U_f = \sqrt{U_g^2 - \delta U_f^2} + \Delta U_f \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta U_f = \frac{P_{\text{g,f}} R_f + Q_{\text{g,f}} X_f}{U_f} \\ \delta U_f = \frac{P_{\text{g,f}} X_f - Q_{\text{g,f}} R_f}{U_f} \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_g 为电网等效电压; U_f 为故障下充电站并网点电压; ΔU_f 与 δU_f 分别为并网点电压与电网等效电压之间的电压降落横分量与纵分量。

根据式(8)可得关于充电站有功与无功功率的并网点电压一元四次方程为

$$U_f^4 - [2(P_{\text{g,f}} R_f + Q_{\text{g,f}} X_f) + U_g^2] U_f^2 + (P_{\text{g,f}}^2 + Q_{\text{g,f}}^2)(R_f^2 + X_f^2) = 0 \quad (9)$$

求解式(9)可得并网点电压与充电站注入有功功率和无功功率的关系为

$$U_f^2 = P_{\text{g,f}} R_f + Q_{\text{g,f}} X_f + \frac{1}{2} U_g^2 \pm \sqrt{\left[P_{\text{g,f}} R_f + Q_{\text{g,f}} X_f + \frac{1}{2} U_g^2 \right]^2 - (P_{\text{g,f}}^2 + Q_{\text{g,f}}^2)(R_f^2 + X_f^2)} \quad (10)$$

由式(7)可得并网点电压与电压降落横分量关系为

$$U_f - \Delta U_f = \sqrt{U_g^2 - \delta U_f^2} \geq 0 \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)可得

$$U_f - \Delta U_f = \frac{\frac{1}{2} U_g^2 \pm \sqrt{[\Delta U_f (U_f - \Delta U_f) - \delta U_f^2] \cdot U_f (U_f - \Delta U_f) + \left(\frac{1}{2} U_g^2\right)^2}}{U_f} \quad (12)$$

当并网点电压与电网等效电压之间的功角 δ 较小时, δU_f 也较小, 式(12)中 $[\Delta U_f (U_f - \Delta U_f) - \delta U_f^2] > 0$, 使得当取负根时, 式(12) < 0 , 与式(11)相悖, 而取正根时, 永远满足式(11)。因此, 式(10)舍去负号的根, 保留正号的根。式(10)为并网点电压的幅值平方关于充电站发出有功与无功功率的二元连续函数。二元连续函数在定义域的最值一定由定义域内的极值点或定义域边界上某点取得^[25]。对式(10)的有功与无功功率分别求偏导, 极值点为使得2个偏导数同时等于0的有功与无功功率组合。偏导数可写为

$$\frac{\partial U_f^2}{\partial P_{\text{g,f}}} = R_f + \frac{R_f U_g^2 + 2R_f Q_{\text{g,f}} X_f - 2P_{\text{g,f}} X_f^2}{\sqrt{[2(P_{\text{g,f}} R_f + Q_{\text{g,f}} X_f) + U_g^2]^2 - 4(P_{\text{g,f}}^2 + Q_{\text{g,f}}^2)(R_f^2 + X_f^2)}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_f^2}{\partial Q_{\text{g,f}}} = X_f + \frac{X_f U_g^2 + 2X_f P_{\text{g,f}} R_f - 2Q_{\text{g,f}} R_f^2}{\sqrt{[2(P_{\text{g,f}} R_f + Q_{\text{g,f}} X_f) + U_g^2]^2 - 4(P_{\text{g,f}}^2 + Q_{\text{g,f}}^2)(R_f^2 + X_f^2)}} \quad (14)$$

若存在使式(13)与式(14)同时为0的有功与无功功率组合, 则该组合必定使得式(13)等于式(14)。令式(13)与式(14)同时为0, 可得

$$Q_{\text{g,f}} R_f = P_{\text{g,f}} X_f \quad (15)$$

将式(15)分别代入式(13)与式(14)中, 可得

$$\frac{\partial U_f^2}{\partial P_{\text{g,f}}} = R_f + \frac{R_f U_g^2}{\sqrt{4P_{\text{g,f}} R_f U_g^2 + 4Q_{\text{g,f}} X_f U_g^2 + U_g^4}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial U_f^2}{\partial Q_{\text{g,f}}} = X_f + \frac{X_f U_g^2}{\sqrt{4P_{\text{g,f}} R_f U_g^2 + 4Q_{\text{g,f}} X_f U_g^2 + U_g^4}} \quad (17)$$

式(16)与式(17)恒大于0, 与式(13)与式(14)同时等于0相矛盾。则不存在有功与无功功率组合使得式(13)与式(14)同时为0, 即式(10)不存在极值点。则式(10)中使得并网点电压幅值最大的有功与无功功率组合一定在定义域的边界上。为避免充电站直流电压与交流电流越限, 故障期间充电站有功与无功功率需在故障穿越功率可行域内。因此, 式(10)的有功与无功功率的定义域为故障穿越功率可行域。最大限度支撑并网点电压的充电站有功与无功功率仅能在故障穿越功率可行域边界取得。如图 2 所示, 故障穿

越功率域边界分别为线段 ab 、线段 bc 和曲线 ac 。

联立式(5)与式(10), 可得线段 ab 上使并网点电压取最大值的充电站有功与无功功率组合为

$$\begin{cases} P_{\text{ref}1} = P_{\text{s},f} - \frac{C(U_{\text{dc},\text{th}}^2 - U_{\text{dc}}^{*2})}{2t_1} \\ Q_{\text{ref}1} = \min\{Q_{\text{line},ab}, Q_a\} \end{cases} \quad (18)$$

式中: t_1 为主保护动作时间; $Q_{\text{line},ab}$ 为直线 ab 上使式(10)取最大值的无功功率值; Q_a 为点 a 无功功率。 $Q_{\text{line},ab}$ 与 Q_a 分别表示为

$$Q_{\text{line},ab} = \frac{X_f(2R_f P_{\text{ref}1} + U_g^2) - X_f \sqrt{(2R_f P_{\text{ref}1} + U_g^2)^2 - 4R_f^2 P_{\text{ref}1}^2}}{2R_f^2} \quad (19)$$

$$Q_a = \sqrt{(U_{\text{f}0} K_I I_N)^2 - \left[P_{\text{s},f} - \frac{C(U_{\text{dc},\text{th}}^2 - U_{\text{dc}}^{*2})}{2t_1} \right]^2} \quad (20)$$

由式(13)可得到无功功率为 0 时, 使并网点电压最大的充电站有功功率 P_x 为

$$P_x = \frac{U_g^2 R_f}{X_f^2} \quad (21)$$

则线段 bc 上使并网点电压取最大值的充电站有功与无功功率组合为

$$\begin{cases} P_{\text{ref}2} = \text{mid}\{P_b, P_x, P_c\} \\ Q_{\text{ref}2} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_b 为点 b 无功功率; P_c 为点 c 无功功率; $\text{mid}\{\}$ 表示取中位数运算。 P_b 、 P_c 分别表示为

$$P_b = P_{\text{s},f} - \frac{C(U_{\text{dc},\text{th}}^2 - U_{\text{dc}}^{*2})}{2t_1} \quad (23)$$

$$P_c = U_{\text{f}0} K_I I_N \quad (24)$$

联立式(3)与式(10), 采用拉格朗日乘法, 可得 VSC 交流电流限制的功率范围边界上使并网点电压最大的充电站有功功率 P_{curve} 为

$$P_{\text{curve}} = \frac{U_{\text{f}0} K_I I_N R_f}{\sqrt{R_f^2 + X_f^2}} \quad (25)$$

则曲线 ac 上使并网点电压取最大值的充电站有功与无功功率组合为

$$\begin{cases} P_{\text{ref}3} = \max\{P_{\text{curve}}, P_a\} \\ Q_{\text{ref}3} = \sqrt{(U_{\text{f}0} K_I I_N)^2 - P_{\text{ref}3}^2} \end{cases} \quad (26)$$

式中: P_a 为点 a 有功功率, 表示为

$$P_a = P_{\text{s},f} - \frac{C(U_{\text{dc},\text{th}}^2 - U_{\text{dc}}^{*2})}{2t_1} \quad (27)$$

3 兼顾电压支撑的充电站自适应故障穿越方法

3.1 自适应故障穿越控制思想

在电网故障期间, 充电站应在避免直流电压与交流电流越限的安全穿越下最大限度支撑并网点电压, 以改善故障特性。并且由于充电站放电功率的调整需要同时控制多台 DAB, 为减小故障穿越过程中的控制复杂度, 应先调节 VSC 功率再调节充电站放电功率。电网故障后, 若极限故障时间大于主保护动作时间, 则故障穿越功率可行域存在, 如图 4 中, 蓝色虚线为主保护动作时刻 t_1 的充电站功率下边界, 其中 $t_1 < T_{\text{max}}$ 。此时, 依靠 VSC 有功与无功功率调节可避免直流电压与交流电流越限。因此, 充电站放电功率参考值保持不变, 将 VSC 直流电压控制切换为定功率控制, 功率参考值设置为 $(P_{\text{max}1}, Q_{\text{max}1})$ 。如图 4 所示, M_1 、 M_2 、 M_3 分别对应式(18)、式(22)和式(26)的有功与无功功率组合, 分别代入式(10), 计算并网点电压, 可得使并网点电压最大的有功与无功功率组合 $(P_{\text{max}1}, Q_{\text{max}1})$, 即可在避免直流电压与交流电流越限下最大限度支撑并网点电压。

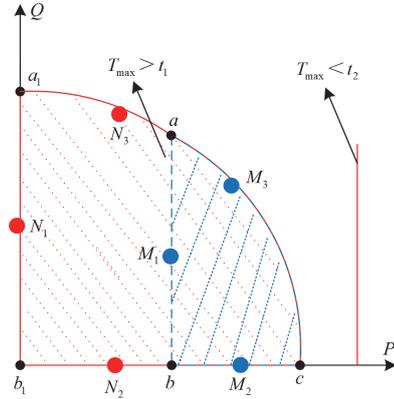


图 4 自适应故障穿越控制原理

Fig. 4 Principle of adaptive fault ride-through control

电网故障主要由主保护切除, 但由于保护灵敏度、可靠性等因素, 主保护可能拒动, 使得故障由后备保护动作切除^[26]。此时, 直流电压已经在越限的临界点, 调整 VSC 有功功率已无法避免直流电压越限。因此, 在主保护动作时刻, 若主保护拒动, 将 VSC 切换为定直流电压控制, 并通过调整充电站放电功率避免直流电压越限。调整放电功率改变充电站有功功率下边界, 下边界最小值可取至零。但是, VSC 始终需满足交流电流限幅。因此, 以交流电流限制的功率范围为充电站功率定义域, 可得最大限度支撑并网点电压的充电站有功与无功功率在以交流电流限制的功率范围边界上取得。如图 4 中

线段 a_1b_1 、线段 b_1c 、曲线 a_1c 所围成的范围为交流电流限制的充电站功率定义域。由式(13)可得线段 a_1b_1 上使并网点电压最大的充电站无功功率 Q_y 为

$$Q_y = \frac{U_g^2 X_f}{R_f^2} \quad (28)$$

线段 a_1b_1 上使并网点电压最大的充电站有功与无功功率组合为

$$\begin{cases} P'_{\text{ref1}} = 0 \\ Q'_{\text{ref1}} = \min\{Q_y, Q_{a_1}\} \end{cases} \quad (29)$$

式中: Q_{a_1} 为点 a_1 无功功率。

$$Q_{a_1} = U_{f0} K_1 I_N \quad (30)$$

线段 b_1c 与线段 bc 相比, 缺少了线段 b_1b 的约束。则由式(22), 线段 b_1c 上使并网点电压最大的充电站有功与无功功率组合为

$$\begin{cases} P'_{\text{ref2}} = \min\{P_x, P_c\} \\ Q'_{\text{ref2}} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

曲线 a_1c 与曲线 ac 相比, 缺少了曲线 a_1a 的约束。则由式(26), 曲线 a_1c 上使并网点电压最大的充电站有功与无功功率组合为

$$\begin{cases} P'_{\text{ref3}} = P_{\text{curve}} \\ Q'_{\text{ref3}} = \sqrt{(U_{f0} K_1 I_N)^2 - P_{\text{ref3}}^2} \end{cases} \quad (32)$$

图 4 中, N_1 、 N_2 、 N_3 分别对应式(29)、式(31)和式(32)的有功与无功功率组合, 分别代入式(10), 计算并网点电压, 可得使并网点电压最大的有功与无功功率组合 $(P_{\text{max2}}, Q_{\text{max2}})$ 。在主保护拒动时刻将充电站放电功率参考值与 VSC 无功功率参考值设置为 $(P_{\text{max2}}, Q_{\text{max2}})$, 即可在主保护拒动后避免充电站直流电压与交流电流越限并最大限度支撑并网点电压。

若极限故障时间小于主保护动作时间, 充电站故障穿越功率可行域不存在, 表明在交流电流限制下仅调整 VSC 有功与无功功率不能避免直流电压的越限。如图 4 所示, 红色直线为主保护动作时刻 t_2 的充电站功率下边界, 其中 $t_2 > T_{\text{max}}$, 充电站功率可行域不存在。此时, 需调整充电站放电功率才能避免直流电压越限。因此, 故障发生后, 维持 VSC 直流电压控制, 将放电功率参考值与 VSC 无功功率参考值设置为 $(P_{\text{max2}}, Q_{\text{max2}})$, 即在避免直流电压与交流电流越限下最大限度支撑并网点电压。此时, 由于在故障发生时刻已经消除不平衡功率, 即使主保护拒动, 也可始终避免直流电压与交流电流越限。

3.2 自适应故障穿越控制策略

兼顾电压支撑的充电站自适应故障穿越控制如图 5 所示。电网故障后, 采集充电站并网点电压幅

值, 由式(6)计算极限故障时间, 并比较极限故障时间与主保护动作时间的大小。当极限故障时间大于主保护动作时间时, 将 VSC 控制切换为定功率控制, 参考值设置为 $(P_{\text{max1}}, Q_{\text{max1}})$ 。若并网点电压幅值在主保护动作时刻恢复, 将 VSC 有功功率控制切换为直流电压控制, 无功功率参考值与故障前一致, 充电站恢复正常运行; 若并网点电压幅值在主保护在动作时刻未恢复, 则将充电站放电功率参考值调整为 P_{max2} , 同时将 VSC 有功功率控制切换为直流电压控制。当极限故障时间小于主保护动作时间时, VSC 维持直流电压控制与无功功率控制, 无功功率参考值设置为 Q_{max2} , 同时调整充电站放电功率参考值为 P_{max2} 。

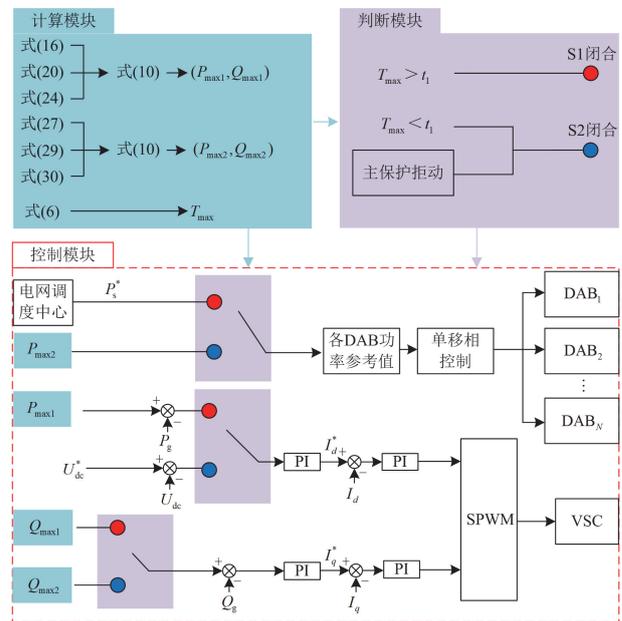


图 5 自适应故障穿越控制框图

Fig. 5 Block diagram of adaptive fault ride-through control

极限故障时间决定于充电站并网点电压与故障持续时间。因此, 根据极限故障时间与保护动作时间的关系, 所提自适应故障穿越控制方法能够适应不同严重故障、采样不同的控制策略, 在避免充电站直流电压与交流电流越限的安全穿越下, 最大限度支撑并网点电压。当极限故障时间大于主保护动作时间时, 自适应故障穿越控制通过量化主保护动作时避免直流电压越限的最小有功功率, 避免了过多增加有功电流, 并通过量化最大电压支撑所需的有功与无功功率, 实现在主保护动作时间前只调整 VSC 功率达到避免直流电压与交流电流越限的同时最大限度支撑并网点电压的目的; 若 VSC 维持直流电压控制, 此时尽管能够避免充电站直流电压越

限,但由于并网点电压跌落导致 VSC 有功电流大幅增加,在交流电流限制下无功电流可能较小,使得充电站难以有效支撑并网点电压;若充电站按照新能源故障穿越导则,根据并网点电压输出无功电流,限制有功电流,则可能因有功功率的大幅降低导致主保护动作前直流电压越限,且高比例无功功率也未必能够最大限度支撑并网点电压。即使主保护未正确动作切除故障,由于在主保护拒动作时刻消除了不平衡功率,自适应故障穿越控制亦能够始终保证了充电站直流电压与交流电流安全,并且根据最大电压支撑点输出有功与无功功率,也能够最大限度支撑充电站并网点电压。

当极限故障时间小于主保护动作时间时,自适应故障穿越控制通过在交流电流限制的 VSC 功率范围内量化最大电压支撑所需的充电站有功与无功功率,利用 VSC 直流电压控制与放电功率参考值调整,实现避免直流电压与交流电流越限的同时最大限度支撑并网点电压;若维持放电功率参考值或采用新能源故障穿越策略,由于此时充电站故障穿越功率可行域不存在,直流电压将在主保护动作前越限,并且并网点电压支撑效果不佳。

4 算例

在 MATLAB/Simulink 中建立图 5 所示仿真模型验证充电站故障穿越控制方法的有效性。充电站通过 0.38 kV/10 kV 变压器接入配电网。折算至低压侧的电网等效电阻与电感分别为 $0.25 + j0.49 \Omega$ 。充电站内共有 4 台电动汽车,直流额定电压为 800 V, VSC 外环控制参数 $k_p = 2$ 、 $k_i = 50$; DAB 参数为 $k_{vp} = 0.0005$ 、 $k_{vi} = 20$ 、 $L_r = 2 \times 10^{-5} \text{ H}$ 、 $f_s = 10\ 000 \text{ Hz}$ 、 $n = 800/420$ 。正常运行下,充电站有功功率为 1 p.u.,无功功率设置为 0。设置系统在 0.3 s 时发生三相短路故障。在故障时刻,电动汽车放电功率分别为 180 kW、190 kW、210 kW 和 220 kW。VSC 最大交流电流允许系数为 1.2,直流电压上限为 1.2 p.u.。配电网主保护动作时间为 0.4 s,后备保护动作时间为 1 s。通过设置 3 个对比组验证本文所提控制方法。方法 1:充电站采用定直流电压控制和无功功率控制,无功功率参考值为 0;方法 2 参考新能源故障穿越要求^[27];方法 3 为本文所提出的方法。

4.1 Case1: 极限故障时间大于主保护动作时间主保护正常动作

故障瞬间充电站并网点电压跌落至 0.65 p.u.。由式(6)可知极限故障时间为 112 ms,大于主保护动

作时间。方法 3 中 VSC 切换为有功与无功功率控制,参考值分别为 0.75 p.u.与 0.21 p.u.。3 种方法下充电站并网点电压、直流电压、VSC 有功和无功功率以及 DAB 传输功率如图 6 所示。

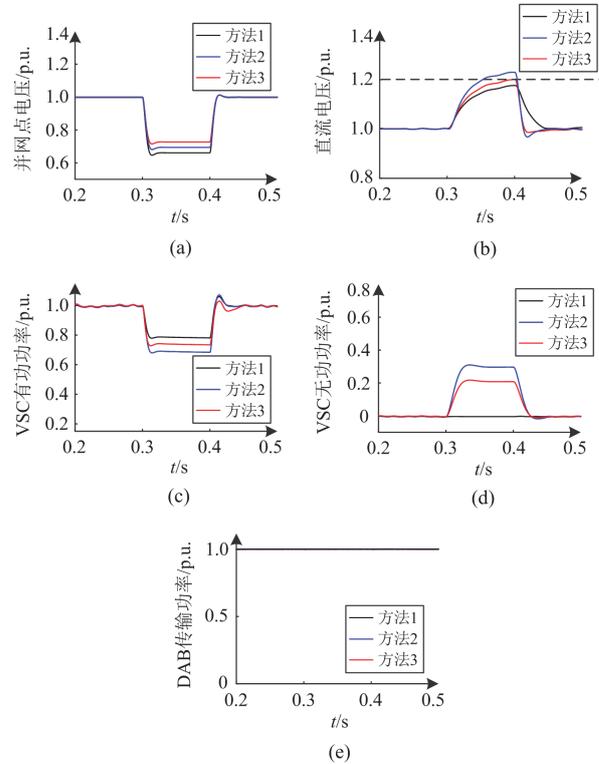


图 6 Case1 的充电站电气量仿真结果

Fig. 6 Simulation results of parameters of charging station for Case 1

如图 6(b)所示,方法 1 与方法 3 下直流电压在故障期间未越限,方法 2 下直流电压在故障发生后约 50 ms 后越限。如图 6(c)和图 6(d)所示,在方法 1 下,故障期间充电站有功与无功功率分别为 0.78 p.u.与 0。方法 2 以无功控制优先,根据并网点电压跌落输出了 0.33 p.u.无功功率,相应的有功功率为 0.71 p.u.。方法 3 输出的有功与无功功率分别为 0.75 p.u.与 0.21 p.u.。如图 6(a)所示,由于在方法 1 下充电站仅输出有功功率,并网点电压抬升至 0.67 p.u.;方法 2 中,由于充电站以无功控制优先,并网点电压达到 0.71 p.u.;方法 3 中充电站按照最大电压控制点输出功率,并网点电压为 0.75 p.u.,较于方法 1 与方法 2 电压支撑效果明显提升。如图 6(e)所示,DAB 传输功率均基本维持在故障前的传输功率。方法 3 对 VSC 控制的改进不影响故障期间充电站的放电,且能够在避免直流电压与交流电流越限的同时更好地支撑并网点电压。3 种方法的结果

对比如表 1 所示。

表 1 Case1 结果对比

Table 1 Results comparison of Case1

	方法 1	方法 2	方法 3
并网点电压/p.u.	0.67	0.71	0.75
直流电压	未越限	越限	未越限
VSC 有功功率/p.u.	0.78	0.71	0.75
VSC 无功功率/p.u.	0	0.33	0.21
DAB 传输功率/p.u.	1	1	1

4.2 Case2: 极限故障时间大于主保护动作时间主保护拒动

故障条件不变, 但主保护在 0.4 s 时拒动, 故障在 1 s 时由后备保护切除。方法 2 和方法 3 的控制策略和参考值在主保护拒动前与 Case1 相同。方法 3 在 0.4 s 时检测故障未被切除后恢复 VSC 直流电压控制, 同时调整充电站放电功率参考值为 0.73 p.u., VSC 无功功率参考值为 0.27 p.u.。充电站并网点电压、直流电压、VSC 有功和无功功率以及 DAB 传输功率如图 7 所示。

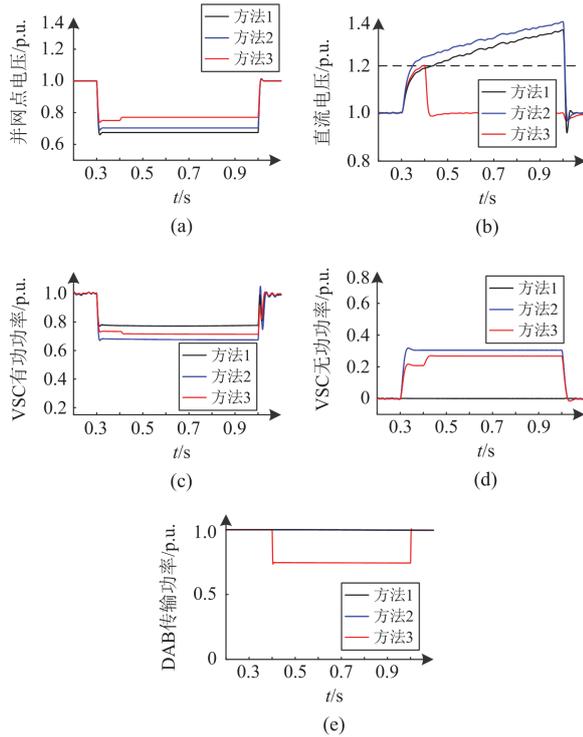


图 7 Case2 的充电站电气量仿真结果

Fig. 7 Simulation results of parameters of charging station for Case2

如图 7(b)所示, 方法 1 下直流电压在主保护拒动后 30 ms 越限。方法 2 下直流电压在主保护动作前已经越限。在方法 3 中, 主保护拒动时刻调整了充电站放电功率参考值, 使得 VSC 有功功率与 DAB

传输功率再次平衡, 直流电压在 0.4 s 后逐渐恢复至参考值, 避免了直流电压的越限。如图 7(c)与图 7(d), 方法 1 中, 由于维持故障前的控制策略, VSC 有功与无功功率分别为 0.78 p.u.与 0; 方法 2 中 VSC 有功与无功功率分别为 0.71 p.u.和 0.33 p.u.; 方法 3 中 VSC 有功与无功功率分别从 0.75 p.u.与 0.21 p.u.变化为 0.73 p.u.和 0.27 p.u.。如图 7(a)所示, 在方法 1 下, 故障期间由于充电站只输出有功功率电网电压支撑效果有限, 并网点电压为 0.68 p.u.; 方法 2 中由于充电站未按照最大电压控制点输出功率, 并网点电压为 0.71 p.u., 电压支撑效果并不明显; 方法 3 中充电站按照拒动后按照 VSC 交流电流限制的功率范围边界上最大电压控制点输出功率, 并网点电压由主保护拒动前的 0.75 p.u.上升到 0.77 p.u., 较于方法 1 与方法 2 电压支撑效果明显提升。如图 7(e)所示, 方法 1 与方法 2 中整个故障过程并未调节 DAB 传输功率, 使得图 7(b)中的直流电压越限; 方法 3 中, VSC 有功功率在直流电压到达越限值时跟随充电站放电功率参考值被调整为 0.73 p.u., 避免了图 7(b)中的直流电压越限。方法 1 与方法 2 下未将 VSC 运行于故障穿越功率可行域内最大电压支撑点, 且不能避免直流电压越限; 方法 3 在主保护拒动下能够在避免直流电压与交流电流越限的同时更好地支撑并网点电压。3 种方法的结果对比如表 2 所示。

表 2 Case2 结果对比

Table 2 Results comparison of Case2

	方法 1	方法 2	方法 3
并网点电压/p.u.	0.68	0.71	0.77
直流电压	越限	越限	未越限
VSC 有功功率/p.u.	0.78	0.71	0.73
VSC 无功功率/p.u.	0	0.33	0.27
DAB 传输功率/p.u.	1	1	0.73

4.3 Case3: 极限故障时间小于主保护动作时间

故障后充电站并网点电压跌落至 0.5 p.u.。由式 (6), 极限故障时间为 61 ms, 小于主保护动作时间 100 ms。方法 3 维持 VSC 的直流电压控制与无功功率控制, 无功功率参考值为 0.27 p.u., 充电站放电功率参考值为 0.53 p.u.。3 种方法下充电站并网点电压、直流电压、VSC 有功和无功功率以及 DAB 传输功率如图 8 所示。

如图 8(b)所示, 方法 1 下直流电压在故障后 80 ms 越限。方法 2 的直流电压在故障后 20 ms 越限, 且在故障切除时刻达到了 1.3 p.u.附近; 方法 3 的直流电压基本维持在 1.0 p.u., 避免了直流电压越限。如图 8(c)与(d)所示, 在方法 1 下, 充电站有功与无功功率分别为 0.6 p.u.与 0; 方法 2 下充电站输出无功

功率为 0.4 p.u., 有功功率为 0.45 p.u.; 方法 3 输出了 0.53 p.u.与 0.27 p.u.的有功与无功功率。如图 8(a)所示, 在方法 1 下, 并网点电压抬升到 0.53 p.u.; 方法 2 的并网点电压抬升到 0.58 p.u.; 方法 3 的并网点电压抬升到 0.63 p.u.。方法 3 较于方法 1 与方法 2 电压支撑效果明显提升。如图 8(e)所示, 方法 1 与方法 2 下由于充电站放电功率参考值未改变, DAB 传输功率基本维持在故障前的大小; 方法 3 在故障发生时刻改变充电站放电功率参考值, 以消除不平衡功率, 避免直流电压越限。3 种方法的结果对比如表 3 所示。

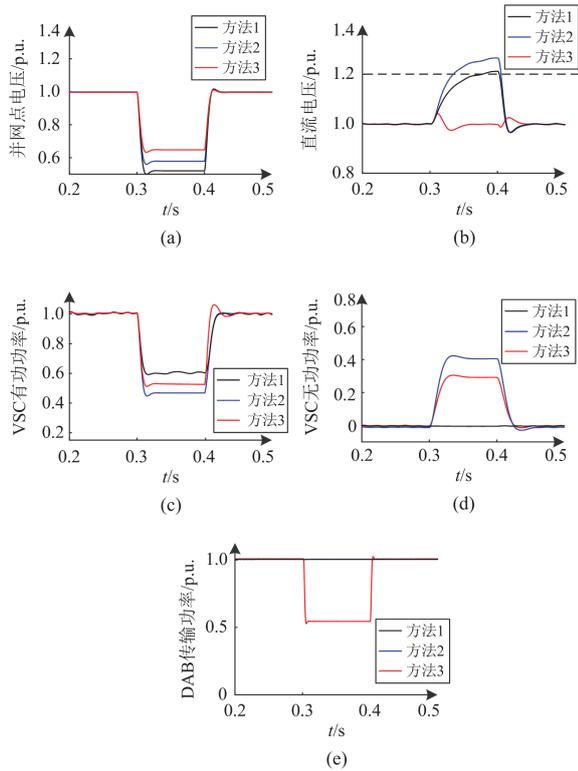


图 8 Case3 的充电站电气量仿真结果

Fig. 8 Simulation results of parameters of charging station for Case3

表 3 Case3 结果对比

Table 3 Results comparison of Case3

	方法 1	方法 2	方法 3
并网点电压/p.u.	0.53	0.58	0.63
直流电压	越限	越限	未越限
VSC 有功功率/p.u.	0.6	0.45	0.53
VSC 无功功率/p.u.	0	0.4	0.27
DAB 传输功率/p.u.	1	1	0.53

4. 4 Case4: 极限故障时间小于主保护动作时间且主保护拒动

故障条件与 Case3 相同, 但主保护在 0.4 s 时拒

动, 故障在 1 s 时由后备保护切除。方法 2 和方法 3 的控制参考值与 Case3 相同。充电站并网点电压、直流电压、VSC 有功和无功功率以及 DAB 传输功率如图 9 所示。

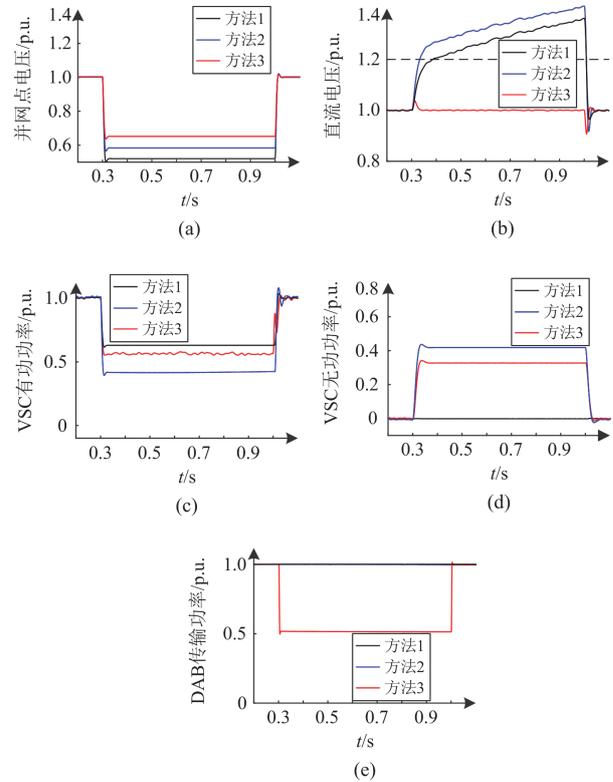


图 9 Case4 的充电站电气量仿真结果

Fig. 9 Simulation results of parameters of charging station for Case4

如图 9(b)所示, 方法 1 下直流电压在故障后 80 ms 越限。方法 2 中直流电压在故障后 20 ms 到达越限值, 在故障切除时刻已经超过了 1.4 p.u.; 方法 3 中, 直流电压在故障发生后基本维持在 1.0 p.u., 避免了直流电压越限。如图 9(c)与图 9(d), 方法 1 中, VSC 有功与无功功率分别为 0.6 p.u.与 0; 方法 2 中 VSC 有功与无功功率分别为 0.45 p.u.和 0.4 p.u.; 方法 3 中 VSC 有功与无功功率分别为 0.53 p.u.与 0.27 p.u.。如图 9(a)所示, 方法 1 的电压支撑效果不明显, 并网点电压抬升至 0.53 p.u.; 方法 2 的并网点电压抬升到 0.58 p.u.; 方法 3 的并网点电压抬升到 0.63 p.u., 较于方法 1 与方法 2 电压支撑效果明显提升。如图 9(e)所示, 方法 3 中, DAB 传输功率在故障发生时就调整为 0.53 p.u., 避免了直流电压越限。方法 3 在极限故障时间小于主保护动作时间且主保护拒动下也能够在避免直流电压与交流电流越限的同时更好

地支撑并网点电压。3种方法的结果对比如表4所示。

表4 Case4 结果对比

Table 4 Results comparison of Case4

	方法1	方法2	方法3
并网点电压/p.u.	0.53	0.58	0.63
直流电压	越限	越限	未越限
VSC有功功率/p.u.	0.6	0.45	0.53
VSC无功功率/p.u.	0	0.4	0.27
DAB传输功率/p.u.	1	1	0.53

5 结论

针对 V2G 充电站故障穿越方法的欠缺,本文建立了交流电流限制下避免直流电压越限的故障穿越功率可行域,提出了避免直流电压越限的极限故障时间的概念与计算方法,解析了避免直流电压越限的充电站最大电压支撑点,提出了兼顾电压支撑的充电站自适应故障穿越控制方法。理论分析与仿真表明,当极限故障时间大于主保护动作时间时,所提出的方法能够在仅调整 VSC 功率下避免直流电压与交流电流越限并最大限度支撑并网点电压;当极限故障时间小于主保护动作时间时,所提出的方法通过控制充电站放电功率与 VSC 无功功率,在避免直流电压与交流电流越限下最大限度支撑并网点电压。所提方法通过实时监测并网点电压,计算极限故障时间并控制两级变换器实现故障穿越,仅需更改变换器控制参考值,无需附加硬件,可直接应用于现有充电站,并为 V2G 模式下充电站故障穿越相关技术标准制定提供参考。

参考文献

- [1] 姚蓝霓, 李钦豪, 杨景旭, 等. 考虑电动汽车充放电支撑的配用电系统综合无功优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 39-47.
YAO Lanni, LI Qin hao, YANG Jingxu, et al. Comprehensive reactive power optimization of power distribution and consumption system with support of electric vehicle charging and discharging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 39-47.
- [2] 张倩, 陈熙, 王立永, 等. V2G 直流充电桩检测方案与检测系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 161-170.
ZHANG Qian, CHEN Xi, WANG Liyong, et al. Design of detection scheme and system for a V2G DC charging pile[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 161-170.
- [3] 黄学良, 刘永东, 沈斐, 等. 电动汽车与电网互动: 综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 3-23.
HUANG Xu liang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [4] LI Z, XU J, WANG K, et al. FPGA-based real-time simulation for EV station with multiple high-frequency chargers based on C-EMTP algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 1-11.
- [5] 刘春喜, 王涛, 田迎澳. 双有源桥变换器的新型双重移相电流应力优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 88-98.
LIU Chunxi, WANG Tao, TIAN Ying'ao. A novel dual-phase-shift current stress optimization control strategy for dual-active-bridge converters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 88-98.
- [6] 刘玲, 林刚, 焦世青, 等. 充电站直流微网虚拟直流电机控制策略及其动态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 28-35.
LIU Ling, LIN Gang, JIAO Shiqing, et al. Virtual DC generator control strategy and its dynamic analysis of DC charging station microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 28-35.
- [7] 欧阳金鑫, 陈纪宇, 李昂, 等. 兼顾直流电压安全与无功支撑的柔性直流输电故障穿越控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6129-6144.
OUYANG Jinxin, CHEN Jiyu, LI Ang, et al. Fault ride-through control method for VSC-HVDC balancing between DC voltage security and reactive power support[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6129-6144.
- [8] 刘念, 张颖达, 赵璟, 等. 配网故障情况下电动汽车换电站 V2G 运行的主动控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 925-932.
LIU Nian, ZHANG Yingda, ZHAO Jing, et al. An active control strategy for vehicle to grid operation of battery swap station under distribution network fault[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 925-932.
- [9] 马万硕, 高厚磊, 张运驰, 等. 基于 EWT 的分布式光储 PCC 功率波动自适应平抑方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 51-61.
MA Wanshuo, GAO Houlei, ZHANG Yunchi, et al. Adaptive PCC power fluctuation smoothing method based on EWT for distributed PV-energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 51-61.
- [10] 曹宇, 胡鹏飞, 蔡婉琪, 等. 基于 MMC 的超级电容与蓄电池混合储能系统及其混合同步控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 78-89.
CAO Yu, HU Pengfei, CAI Wanqi, et al. MMC based super capacitor and battery hybrid energy storage system and hybrid synchronous control strategy[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 78-89.
- [11] 骆钊, 田肖, 莫熙, 等. 含废旧矿并抽蓄电站的源-荷-储协同控制调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 134-144.

- LUO Zhao, TIAN Xiao, MO Xi, et al. Frequency regulation of source-load-storage collaborative control with waste mine-pumped storage power stations[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 134-144.
- [12] NADERI S B, NEGNEVITSKY M, MUTTAQI K M. A modified DC chopper for limiting the fault current and controlling the DC-link voltage to enhance fault ride-through capability of doubly-fed induction-generator-based wind turbine[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(2): 2021-2032.
- [13] OUYANG Jinxin, CHEN Jiyu, HUANGFU Baixiang. Multi-degree-of-freedom synergistic control method for VSC-HVDC integrated offshore wind farm under severe onshore disturbance[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2025, 40(2): 1662-1674.
- [14] GHOSH A, JINDAL A K, JOSHI A. Design of a capacitor-supported dynamic voltage restorer for unbalanced and distorted loads[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(1): 405-413.
- [15] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Advanced voltage support and active power flow control in grid-connected converters under unbalanced conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(2): 1855-1864.
- [16] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Control strategy for distribution generation inverters to maximize the voltage support in the lowest phase during voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2346-2355.
- [17] 彭星, 姜飞, 涂春鸣, 等. 不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4259-4268.
PENG Xing, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Optimal voltage support strategy for photovoltaic inverters under asymmetric faults[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4259-4268.
- [18] GHADERIJANI M M, CAMACHO A, MOREIRA C, et al. Imbalance-voltage mitigation in an inverter-based distributed generation system using a minimum current-based control strategy[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(3): 1399-1409.
- [19] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Positive and negative sequence control strategies to maximize the voltage support in resistive-inductive grids during grid faults[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(6): 5362-5373.
- [20] 裴振坤, 王学梅, 康龙云. 电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(18): 17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(18): 17-32.
- [21] 刘东奇, 王耀南, 申永鹏. 基于 T-S 模糊控制器的电动汽车 V2G 智能充电站控制策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(2): 206-214.
LIU Dongqi, WANG Yaonan, SHEN Yongpeng. Research of V2G smart charging station control strategy using T-S fuzzy controller[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(2): 206-214.
- [22] YU Jianfeng, OUYANG Jinxin, ZHANG Aogui. Modeling of dynamic control error and emergency frequency control for direct-drive PMSG-based wind turbine under grid fault[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(3): 1690-1702.
- [23] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(2): 359-371.
XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(2): 359-371.
- [24] CHEN Jiyu, OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, et al. DC voltage cooperative control method for VSC-HVDC under receiving-end grid fault[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(3): 1659-1673.
- [25] 同济大学数学系. 高等数学[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [26] 李海锋, 许灿雄, 梁远升, 等. 计及换流站控制响应的多端混合直流线路后备保护设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 155-163.
LI Haifeng, XU Canxiong, LIANG Yuansheng, et al. Backup protection design for multi-terminal hybrid HVDC lines considering control response[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 155-163.
- [27] 杨玉坤, 许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(18): 106-116.
YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(18): 106-116.

收稿日期: 2025-03-24; 修回日期: 2025-06-16

作者简介:

尹 栋(1990—), 男, 博士研究生, 副高级工程师, 研究方向为新能源电力系统、配网自动化、配电网; E-mail: sinking_black@foxmail.com

欧阳金鑫(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统、交直流混联电力系统故障分析、保护与控制。E-mail: jinxinoy@163.com

(编辑 石晋美)