

构网型 MMC-SVG 控制方案的设计

梁少辉¹, 陈俊儒¹, 陈永平¹, 陈 军², 南东亮², 刘牧阳¹

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐市 830046; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 随着新能源设备的广泛接入, 电网弱化, 系统惯量水平持续下降, 系统频率面临严峻的失稳风险。传统的静止无功发生器(SVG)采用跟网型控制, 弱电网下性能恶化, 难以为电网提供惯性支撑。针对此问题, 通过模拟虚拟同步发电机(VSG), 基于模块化多电平换流器(MMC)拓扑结构提出了一种构网型SVG的控制策略及内部能量管理方案。首先, 分析了MMC的拓扑结构及工作原理。其次, 通过直流侧电容动态方程设计了构网型SVG的外层能量控制方案, 建立了构网型SVG的小信号模型, 分析了惯量与阻尼对系统稳定性的影响。然后, 分析了MMC内部能量转移过程, 提出了内部能量均衡控制方案。最后, 通过MATLAB实验仿真验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 构网型SVG; MMC; 惯量; 阻尼; 外层能量控制方案; 内部能量均衡控制方案

中图分类号: TM464

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.04007

Design of Grid-forming MMC-SVG Control Scheme

LIANG Shaohui¹, CHEN Junru¹, CHEN Yongping¹, CHEN Jun²,
NAN Dongliang², LIU Muyang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: With the widespread integration of renewable energy devices, power grids are weakening, system inertia levels continue to decline, and system frequency faces severe instability risks. Traditional static var generators (SVGs) adopt grid-following control, which leads to performance degradation in weak grids and fails to provide inertial support. To address this issue, this study proposes a grid-forming SVG control strategy and internal energy management scheme based on a modular multilevel converter (MMC) topology by emulating a virtual synchronous generator (VSG). First, the topology and operating principles of the MMC were analyzed. Second, an outer-loop energy control scheme for the grid-forming SVG was designed using DC-side capacitor dynamic equations. A small-signal model of the grid-forming SVG was established to analyze the impact of inertia and damping on system stability. Subsequently, the internal energy transfer process within the MMC was analyzed, and an internal energy balancing control scheme was proposed. Finally, MATLAB-based simulations verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: grid-forming SVG; MMC; inertia; damping; outer energy control scheme; internal energy balance control scheme

0 引言

随着新能源在电力系统中占比的不断上升, 电网逐渐面临弱化、阻抗增大和阻尼惯量下降等一系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52407147); 新疆维吾尔自治区科技厅重大科技专项项目(2022A01004-1)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52407147); Major Science and Technology Special Project of the Department of Science and Technology of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022A01004-1)

列挑战^[1-3]。新能源出力的波动性严重影响到了电网电压的质量^[4-5]。其中, 新能源场站多采用跟网型并网方式, 导致电网中电压源数量减少, 电压支撑能力减弱, 增加了电网崩溃的风险^[6-8]。为此, 在新能源接入点增设静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)成为提升系统输送容量和电压稳定性的关键^[9-11]。然而, 现有无功补偿装置在弱电网下性能受限, 矢量控制效果不佳, 同步困难, 无功补偿能力变差^[12-15]。

基于弱电网对传统 SVG 并网稳定性所带来的

负面影响,本文认为可结合构网型控制策略,通过自同步控制来增强 SVG 的弱电网适应性。在构网型技术研究方面,文献[16]提出了虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制策略,然而却未将该控制策略与无功补偿装置联系起来。文献[17]通过比例谐振(Proportional Differentiation, PD)控制器调节直流侧电容电压,未能充分挖掘惯量以及阻尼的作用。文献[18]和文献[19]将电容的充放电过程与 VSG 进行类比,推导出了适用于弱电网下逆变器的自同步控制方案,但并未分析惯量及阻尼参数对其稳定性的影响。文献[20]和文献[21]指出电网在暂态过程中会出现频率扰动,传统电力系统中,同步发电机通过将转子中的势能转化为动能进而缓解电网的频率波动,构网型设备通过模拟同步发电机的运行过程,在电网暂态期间也需要提供足够的能量才能进行惯量支撑。模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)拓扑结构直流侧由众多子模块构成,各子模块中均可配置相应的储能元件,储存能量较多,同时多电平结构有效降低了输出电压波形中的谐波含量^[22-24]。因此较为适合于构网型 SVG 控制策略,然而基于 MMC 拓扑结构的 SVG (Modular Multilevel Converter-Static Var Generator, MMC-SVG)在进行能量输出时,由于内部结构复杂,外界环境的影响、制作工艺的差别使各模块参数不一致,极易导致能量分布不均匀,同时调制方式的不同直接导致了各子模块充放电速度上的差异,故需要合适的内部能量管理方案进行调节。传统的子模块均压控制方式只针对单个子模块内部能量进行调整,当外界因素影响较大时,极易发生超调现象而导致设备失稳。文献[25-27]针对 MMC 内部能量的平衡提出了基于环流的电压均衡控制,但并未对其控制理论进行详细说明。综上所述,目前对于构网型 SVG 尚缺少足够研究及理论指导,基于 MMC 拓扑结构的构网型 SVG 更鲜有说明。

为克服弱电网下锁相环恶化所带来的同步困难,设备稳定性变差的问题,本文通过结合 MMC 的优势,提出可采用构网型控制对 SVG 的同步性能进行改善,并设计了相应的内部能量均衡控制策略。最后基于所提控制策略,通过单机无穷大系统仿真验证了所提控制的有效性,为弱电网下无功补偿装置性能的改善提供了技术支持。

1 构网型 MMC-SVG 拓扑结构及工作原理

构网型 MMC-SVG 的拓扑结构如图 1 所示,其内部由 3 个相单元组成,每个相单元由上、下 2 个桥臂组成。每个桥臂内串联了 N 个半桥子模块 SM_n 。

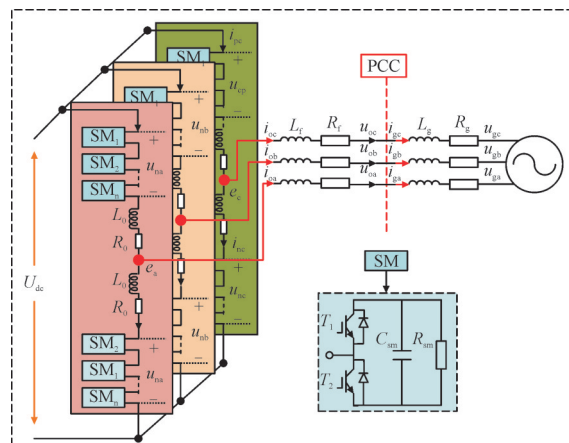


图 1 构网型 MMC-SVG 拓扑结构图

Fig.1 Topology diagram of grid-forming MMC-SVG

图 1 中, PCC 为公共连接点, C_{sm} 与 R_{sm} 分别为子模块内部超级电容器及并联损耗电阻, L_0 与 R_0 分别上、下桥臂串联电感及电阻, 可在设备运行期间稳定其输出电流以及减小电气损耗, u_{pj} 与 u_{nj} 分别为上、下桥臂 j 相输出电压 ($j=a, b, c$), i_{pj} 与 i_{nj} 分别为上、下桥臂输出电流, e_j 为 SVG 输出电势, L_f 与 R_f 分别为设备端口处与交流电网间等效电抗值与电阻值, u_{oj} 与 i_{oj} 分别为并网点电压与电流值, u_{gj} 与 i_{gj} 分别为网侧电压和电流, R_g 与 L_g 分别为网侧等效电感与等效电阻, U_{dc} 为直流侧等效电压值。

由 KCL (Kirchhoff's Current Law) 定理得 MMC 并网点电流如式(1)所示:

$$i_{oj} = i_{pj} - i_{nj} \quad (1)$$

由 KVL (Kirchhoff's Voltage Law) 定理, 列写 MMC 第 j 相上、下桥臂的电气关系如式(2)、式(3)所示:

$$u_{pj} + L_0 \frac{di_{pj}}{dt} + R_0 i_{pj} + L_f \frac{di_{oj}}{dt} + R_f i_{oj} + u_{oj} - \frac{U_{dc}}{2} = 0 \quad (2)$$

$$u_{nj} + L_0 \frac{di_{nj}}{dt} + R_0 i_{nj} - L_f \frac{di_{oj}}{dt} - R_f i_{oj} - u_{oj} - \frac{U_{dc}}{2} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间。

联立式(1)、式(2)与式(3), 可以得出:

$$\left(\frac{L_0}{2} + L_f \right) \frac{di_{oj}}{dt} + \left(\frac{R_0}{2} + R_f \right) i_{oj} = e_j - u_{oj} \quad (4)$$

$$u_{oj} + L_0 \frac{di_{oj}}{dt} + R_0 i_{oj} = \frac{U_{dc}}{2} \quad (5)$$

式中: u_{oj} 为直流侧 j 相环流压降; i_{oj} 为直流侧 j 相

环流。

其中, e_j, u_{ej}, i_{ej} 的表达式分别为:

$$e_j = \frac{u_{nj} - u_{pj}}{2} \quad (6)$$

$$u_{ej} = \frac{u_{pj} + u_{nj}}{2} \quad (7)$$

$$i_{ej} = \frac{i_{pj} + i_{nj}}{2} \quad (8)$$

令 $L = L_0/2 + L_f, R = R_0/2 + R_f$, 对式(4)进行简化可得:

$$L \frac{di_{ej}}{dt} + Ri_{ej} = e_j - u_{ej} \quad (9)$$

由式(9)可得构网型 MMC-SVG 主电路等效模型如图 2 所示。

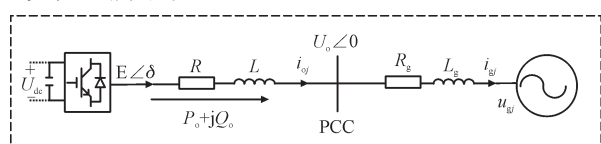


图2 构网型 MMC-SVG 主电路等效模型

Fig.2 Equivalent model of grid-forming MMC-SVG main circuit

图 2 中, $E\angle\delta$ 为 SVG 输出电势 e_j 的向量形式, E 与 δ 分别为其幅值与相角, $U_o\angle 0$ 为 PCC 点电压的向量形式, U_o 与 0 分别为其幅值与相角, P_o 为有功功率, Q_o 为无功功率, U_g 为电网电压幅值。

根据基本电路定律, 构网型 MMC-SVG 流入 PCC 点的三相复功率表示为:

$$\tilde{S}_o = P_o + jQ_o = 3E\angle\delta \left(\frac{E\angle\delta - U_o}{R + jX} \right)^* \quad (10)$$

式中: $\tilde{S}_o$ 为系统向 PCC 点传输的复功率; X 为系统等效电抗; $*$ 为将物理量进行共轭。

由于 R 通常较小, 因而通常情况下可以忽略, 故由式(10)得到 P_o 和 Q_o 的表达式为:

$$\begin{cases} P_o = 3 \frac{EU_o \sin \delta}{X} \\ Q_o = 3 \frac{E(E - U_o \cos \delta)}{X} \end{cases} \quad (11)$$

在构网型 MMC-SVG 的正常运行过程中, δ 值都接近于 0 , 因此 $\sin \delta \approx \delta, \cos \delta \approx 1$ 。此时, 由式(11)可知, P_o 的大小主要受到 δ 大小的影响, 并且 δ 的正负决定了 P_o 的方向。为弥补设备在运行过程中直流侧能量的损耗, 可以通过调整 δ 的大小及方向以保证在正常运行状态时, 设备可从电网吸收一定的有功功率, 当电网频率突变时, 可快速释放直流侧电容中储存的能量。而 Q_o 的大小主要受到 E 和 U_o 幅值大小的影响, 当 PCC 点电压跌落时, 可通过调整输出电势从而改变无功功率在线路上的传

输, 从而对 PCC 点电压进行调整。

构网型 MMC-SVG 的整体控制结构如图 3 所示, 主要包括外层能量控制、电压与无功控制、电压电流闭环、内部能量控制及最近电平逼近 (Nearest Level Modulation, NLM) 控制。在该控制过程中, 首先通过外层能量控制根据指令要求获得合适的参考信号; 之后采用传统的电压电流闭环控制来缩短系统扰动的响应时间, 内部能量控制用以保证相间以及桥臂间能量的平衡, 将二者控制信号相结合进行上下桥臂电压参考值的计算; 最后使用 NLM 控制通过对子模块电容电压进行排序, 来保证子模块电容电压的平衡。

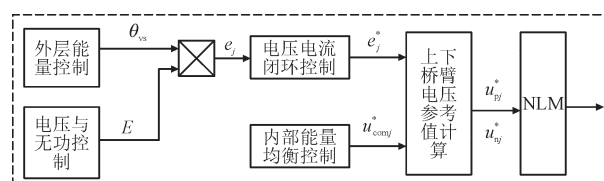


图3 构网型 MMC-SVG 整体控制结构

Fig.3 Overall control structure of grid-forming MMC-SVG

图 3 中, θ_{vs} 为 SVG 的输出相角, e_j^* 为 SVG 各相输出电势参考值, u_{conj}^* 为 SVG 各相环流压降参考值, u_{pj}^* 与 u_{nj}^* 分别为各相上下桥臂电压参考值。

目前有关电压电流双闭环的原理及设计以及最近电平逼近法已有较多学者进行研究, 故本文主要针对外层能量控制以及内部能量控制展开叙述。

2 构网型 MMC-SVG 外层能量控制策略

当采用构网型控制时, 设备需要有足够的能量来对电网进行惯性支撑。通过分析得到 MMC 内部储存能量为:

$$W_m = \frac{1}{2} C_{sm} (U_{sm})^2 \cdot N \cdot 6 = \frac{1}{2} \frac{6C_{sm}}{N} (NU_{sm})^2 = \frac{1}{2} C_{dc} (U_{dc})^2 \quad (12)$$

式中: W_m 为 MMC 内部所包含的全部能量; U_{sm} 为子模块电容电压; C_{dc} 为 MMC 直流侧等效电容;

在不考虑电容自身功率损耗的情况下, 暂态期间直流侧电容输出的有功功率等同于设备输出有功功率。假定设备输出有功功率方向为正方向, 其动态可表示为:

$$P_o = -\frac{1}{2} C_{dc} \frac{dU_{dc}^2}{dt} + K_f [(U_{dc})^2 - (U_{dc}^*)^2] \quad (13)$$

式中: U_{dc}^* 为直流侧电压参考值; K_f 为直流侧电压跟踪系数。

结合 VSG 控制摇摆方程, 可得:

$$J\omega_0 \frac{d\omega_{vs}}{dt} + D\omega_0(\omega_{vs} - \omega_0) = -\frac{1}{2}C_{dc} \frac{dU_{dc}^2}{dt} + K_f[(U_{dc}^*)^2 - (U_{dc}^*)^2] \quad (14)$$

式中: J 为惯性系数; D 为阻尼系数; ω_{vs} 为构网型 SVG 输出角频率; ω_0 为额定输出角频率。

对式(14)进行整理得构网型 SVG 的外层能量控制方程为:

$$\omega_{vs} = \omega_0 + \frac{s + K_f}{(K_J s + K_D)} [(U_{dc}^*)^2 - (U_{dc})^2] \quad (15)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; $K_J = 2\omega_0 J / C_{dc}$ 为等效惯性系数; $K_D = 2D\omega_0 / C_{dc}$ 为等效阻尼系数; $K_f = -2K_f / C_{dc}$ 为等效直流电压跟踪系数。

在无功与电压控制环节中通过采用积分控制来调整采集信号与参考信号间的误差值,从而产生交流侧电压参考值。其中无功控制环节与电压控制环节采用同一个积分器来调节,不同的是调节系数,通过开关来改变控制模式,使恒无功控制与恒电压控制可以平滑切换,避免了模式切换瞬间积分值突变所带来的影响。

结合外层能量控制及电压与无功控制可得构网型 SVG 控制原理图如图 4 所示。

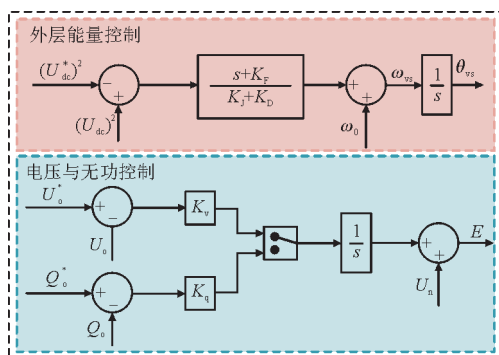


图4 构网型 SVG 控制图

Fig.4 Control diagram of grid-forming SVG

图 4 中, U_o^* 与 Q_o^* 分别为 PCC 点额定电压幅值及设备输出无功参考值, K_v 与 K_q 分别为电压积分系数与无功积分系数, U_n 为 PCC 点电压基准值, θ_{vs} 为设备输出相位角。

为研究所提外层能量控制环节的稳定性,对式(11)、式(13)和式(15)进行小扰动分析得:

$$\begin{cases} \Delta\omega = -\frac{s + K_f}{(K_J s + K_D)} \Delta U_{dc}^2 \\ \Delta\delta = \frac{1}{s} \Delta\omega \\ \Delta P_o = \frac{3EU_o}{X} \Delta\delta \\ \Delta U_{dc}^2 = -\frac{(2/C_{dc})\Delta P_o}{s + K_f} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ΔU_{dc}^2 为直流侧电压扰动; $\Delta\omega$ 为输出角频率扰

动; $\Delta\delta$ 为相角扰动; ΔP_o 为输出有功扰动。

基于式(16)可构建出构网型 SVG 外层能量控制的小信号框图,如图 5 所示。

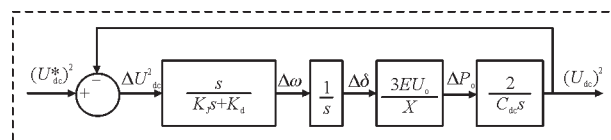


图5 外层能量控制小信号模型

Fig.5 Small-signal model of outer-layer energy control

由图 5 得控制回路的开环传递函数 H_{op} 为:

$$H_{op} = \frac{6EU_o / (XC_{dc} K_J)}{s [s + K_D / (XC_{dc} K_J)]} \quad (17)$$

由式(17)得:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{6EU_o}{XC_{dc} K_J}}, \quad \zeta = \frac{K_D}{2} \sqrt{\frac{1}{6XC_{dc} K_J EU_o}} \quad (18)$$

式中: ω_n 为自振角频率; ζ 为阻尼系数。

由式(18)可知,系统的振荡频率主要与 K_J 有关,阻尼受 K_D 及 K_J 两方面的影响,增大 K_D 与减小 K_J 均可增大阻尼,从而减小有功功率振荡。

为验证 K_J 及 K_D 对控制系统稳定性的影响,设 E 与 U_g 相等均为网侧电压幅值,绘制出式(17)的根轨迹,如图 6 所示。其中, s_1, s_2 为闭环极点。

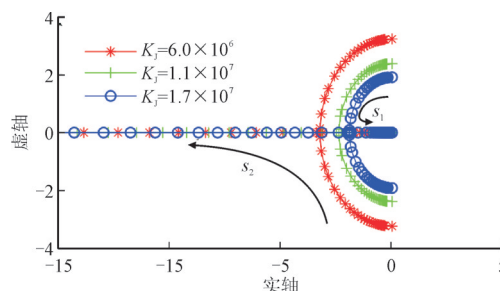


图6 当 K_J 不变, K_D 增大时,直流侧能量控制的根轨迹

Fig.6 Root locus of DC-link energy control with fixed K_J and increased K_D

由图 6 可以看出当 K_J 保持不变时,随着 K_D 的增加,闭环极点 s_1 和 s_2 均逐渐远离虚轴,并逐渐向着负实轴靠近,最后落在负实轴上,系统逐渐由临界阻尼状态向过阻尼状态转变,系统稳定性逐渐增强。同时可以看出随着 K_J 的不断增大,根轨迹曲线逐渐向着虚轴靠近从而导致系统阻尼减小,振荡加剧,稳定性变差。由此可知, K_J 主要影响了系统的振荡频率,而 K_D 主要影响的是系统阻尼的变化,这与式(18)分析一致。

3 构网型 MMC-SVG 内部能量均衡控制

内部能量的稳定是构网型 MMC-SVG 可靠运

(Proportional Integral Resonant, PIR)控制器对环流中各频率分量进行跟踪,最终得到共模电压参考值 u_{comj}^* 。环流跟踪控制环节如图9所示。

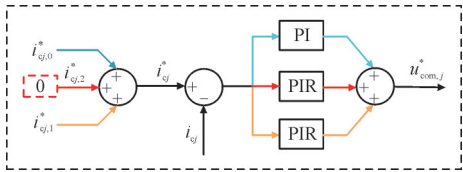


图9 环流跟踪控制结构框图
Fig.9 Control structure diagram of circulating current tracking

图9中, $i_{cj,2}^*$ 为二倍频环流分量参考值, i_{cj}^* 为总环流分量参考值。

由此可获得上桥臂电压 u_{vj}^* 和下桥臂电压 u_{wj}^* 的参考值为:

$$\begin{cases} u_{vj}^* = u_{comj}^* - e_j^* \\ u_{wj}^* = u_{comj}^* + e_j^* \end{cases} \quad (23)$$

4 仿真验证与分析

构网型 MMC-SVG 交流测电抗器承受交流侧的压降,起到了抑制高次谐波的作用。电抗过大会导致不能快速跟踪指令信号;电抗过小,无法有效抑制电流中的高频分量。因而本文中电抗器压降基于相电压的 10%~20% 进行选取。桥臂电抗器在构网型 MMC-SVG 运行过程中用于抑制高频环流,有利于减少设备在运行过程中的能量损耗,但桥臂电抗器过大会影响到输出电压的质量。桥臂子模块数量应考虑开关管的安全裕度,通常子模块电容电压的波动范围一般需要在额定电压的 5% 以内^[30-31]。

为验证本文理论分析的准确性及控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 环境下搭建三相 10 电平构网型 MMC-SVG 模型,并进行了实验仿真。仿真参数见表1所示。

表1 构网型 MMC-SVG 仿真参数
Table 1 Simulation parameters of grid-forming MMC-SVG

仿真参数	数值	仿真参数	数值
U_g/kV	10	L_0/mH	4
f_g/Hz	50	U_{dc}/kV	10
N	10	R_t/Ω	0.1
C_{sm}/mF	5	L_t/mH	88.7
$R_{sm}/\text{M}\Omega$	0.5	R_g/Ω	0.3
R_0/Ω	0.5	L_g/mH	12

4.1 构网型 MMC-SVG 外层能量控制策略验证

为了验证构网型 MMC-SVG 外层能量控制中等效惯性系数 K_J 和等效阻尼系数 K_D 对控制性能的影响,设定在 $t=1.5\text{ s}$ 时,使电网频率跌落 0.5 Hz,分别观察构网型 MMC-SVG 输出频率 f_{vs} 、输出有功功率 P_{vs} 以及直流侧电压 U_{dc} 的变化情况、图10和图11分别给出了不同 K_J 、 K_D 下构网型 MMC-SVG 相关性能的动态仿真结果。

采用固定等效阻尼系数 K_D 策略时,不同等效惯量系数 K_J 下的仿真结果如图10所示。

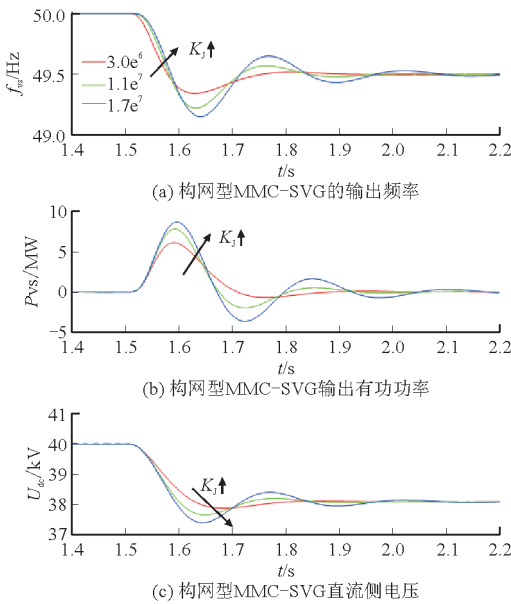
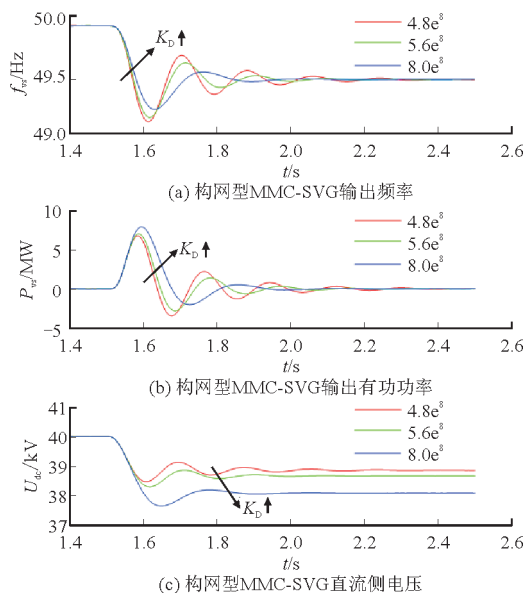


图10 $K_D = 8 \times 10^8$ 时 K_J 对构网型 MMC-SVG 性能的影响
Fig.10 Impact of K_J on grid-forming MMC-SVG performance at $K_D = 8 \times 10^8$

当电网频率跌落时,从图10(a)可以看出构网型 MMC-SVG 可通过直流侧电容的充放电与电网频率保持一致。当 K_J 取值为较小时,系统惯量较小,此时系统处于过阻尼状态,不会出现频率振荡。随着 K_J 的不断增大,在频率跌落瞬间构网型 MMC-SVG 的频率变化率逐渐减小,表现出一定的惯性。从图10(a)中还可以看到随着 K_J 的增大,频率波动也越来越明显,进入稳态的时间越长,动态性能越差,这与前文分析一致,随着 K_J 的增大,频率响应在逐渐由过阻尼转变为欠阻尼状态。由图10(b)与图10(c)可以看出,随着 K_J 的增大,直流侧电压跌落速率及有功功率上升速率都显著增大,表明在该控制策略下直流侧电容可快速释放其储存的能量以提供惯性支撑。

采用固定等效惯性系数 K_J 策略时,不同等效阻尼系数 K_D 下的仿真结果如图11所示。

图 11 $K_J = 1.1 \times 10^7$ 时 K_D 对构网型 MMC-SVG 性能的影响Fig.11 Impact of K_D on grid-forming MMC-SVG performance at $K_J = 1.1 \times 10^7$

由图 11(a)可以看出当电网频率跌落瞬间,系统频率并不会随着 K_D 的变化而产生滞后性,但随着 K_D 的增大,振幅越小,进入稳态的时间越短,系统逐渐由欠阻尼转变为过阻尼状态;且由图 11(b)和图 11(c)可以看出,当电网频率跌落瞬间,不同等效阻尼系数下,构网型 MMC-SVG 输出有功功率及直流侧电压变化速度保持一致,表明 K_D 的变化不会影响到故障瞬间直流侧电容中能量的释放过程,但可有效抑制频率波动与动态响应时间。

4.2 构网型 MMC-SVG 内部能量均衡控制验证

为验证内部能量均衡控制策略的有效性,当构网型 MMC-SVG 运行在额定工况下时,在 1.5 s 时突然增大 a 相上桥臂并联损耗电阻的阻值,人为制造不平衡。其仿真结果如图 12 所示。由图 12 可以看出,在未施加任何控制时为保证交直流侧功率的平衡,MMC 内部 a 相环流中直流分量及基频分量增大,使 a 相电压及上下桥臂电压维持在了恒定值,同时 b, c 相电压也受到影响,导致了桥臂间能量的不平衡,但总体稳定;此时 a 相电压明显低于 b, c 相电压,且 a 相上桥臂电压值低于下桥臂电压值,但由于总体能量保持一致,因而 b, c 相电压值略高。当在 2.5 s 施加上能量均衡控制后,三相环流值跟随上了参考值,通过直流分量以及基频分量对各相能量进行调节,使相间电压以及桥臂间电压都维持在了参考值上,验证了能量均衡控制策略的有效性。

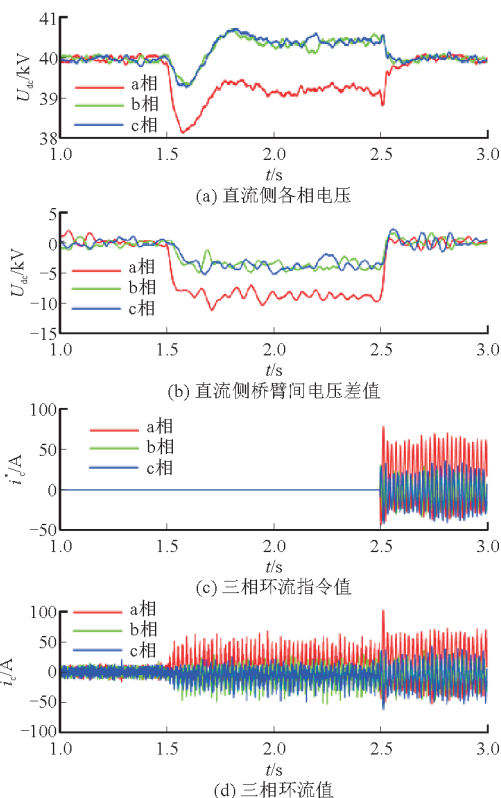


图 12 构网型 MMC-SVG 内部能量均衡控制仿真结果

Fig.12 Simulation results of internal energy balance control in grid-forming MMC-SVG

4 结论

本文提出了一种基于 MMC 的构网型 SVG 的控制策略,具体工作与结论如下:

1) 在外层能量控制中,分析了直流侧电容的充放电原理,通过模拟虚拟同步发电机控制策略,提出了一种构网型 SVG 的控制方案。当电网频率变化时可释放出储存在直流侧电容中的能量为系统提供一定的惯量支撑,减小频率变化率,阻尼的引入减小了系统的频率振荡,改善了弱电网下无功补偿设备与电网频率保持同步的能力。仿真结果验证了所提控制策略的正确性。

2) 通过分析 MMC 内部能量变化过程,依据环流理论提出了构网型 MMC-SVG 的内部能量均衡控制策略。可在直流侧各子模块损耗不一致时,确保 MMC 相间及桥臂间能量的平衡。

参考文献

- [1] 李佳蔚,张冠宇.大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响[J].中国电力,2024,57(6):174-180.

LI Jiawei, ZHANG Guanyu. Impact of large scale distributed new

- energy access on provincial power grid stability[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 174-180.
- [2] 丁坤, 陈博洋, 秦建茹, 等. 大规模新能源集群接入电网的消纳能力评估方法[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 86-94.
DING Kun, CHEN Boyang, QIN Jianru. Evaluation method of consumption ability of new large scale energy clusters connected to weak grids[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 86-94.
- [3] 李雨果, 易皓, 姜鑫, 等. 极弱电网下新能源跟网逆变器低频振荡的机理探究与暂态无功过补稳定性提升策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 482-495.
LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable-energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 482-495.
- [4] 刘海鹏, 杨晓静, 陆涛, 等. 考虑分布式新能源的电网运行风险评估指标体系构建方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(12): 1-14.
LIU Haipeng, YANG Xiaojing, LU Tao, et al. A method for constructing a risk assessment indicator system for grid operation considering distributed new energy sources[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 1-14.
- [5] 杨国山, 朱杰, 杨昌海, 等. 适应波动性风电的电制氢合成甲醇系统柔性优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 149-162.
YANG Guoshan, ZHU Jie, YANG Changhai, et al. Flexible optimal scheduling of electric power for hydrogen based methanol synthesis system adapting to fluctuating wind power[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 149-162.
- [6] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Over-view on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [7] 占萌, 张亚耀, 马锐. 以新能源为主体的新型电力系统模型体系和同步稳定研究综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(6): 878-886.
ZHAN Meng, ZHANG Yayao, Ma Rui. Review on model framework and synchronous stability of renewable-dominated new-type power systems[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2023, 59(6): 878-886.
- [8] 郭嘉庆, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群无功不均衡/无功环流抑制研究[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 109-121.
GUO Jiaqing, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Reactive power unbalance/circulation suppression for wind farm group[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 109-121.
- [9] 王渝红, 宋雨妍, 廖建权, 等. 风电电压主动支撑技术现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3193-3205.
WANG Yujiang, SONG Yuyan, LIAO Jianquan, et al. Review and development trends of DFIG-based wind power voltage active support technology[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3193-3205.
- [10] 陈继开, 成毅平, 李国庆, 等. 风电场汇流站SVG并联系统谐波环流机理及其负面影响分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 53-58.
CHENG Jikai, CHENG Yiping, LI Guoqing, et al. Analysis on mechanism of harmonic circular current in wind farm conflux station parallel-SVG system and its negative impact[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 53-58.
- [11] 熊小玲, 罗博晨, 刘京波, 等. 计及SVG的双馈风电场高频阻抗建模及振荡分析[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2905-2917.
XIONG Xiaoling, LUO Bochen, LIU Jingbo, et al. High frequency impedance modeling and oscillation analysis of DFIG-based station considering SVG[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2905-2917.
- [12] 康勇, 林新春, 潘辰, 等. 弱电网下采用SVC与SVG补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2115-2125.
KANG Yong, LIN Xinchun, PAN Chen, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter considering SVC and SVG compensation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021 41(6): 2115-2125.
- [13] 武海涛, 张宁宁, 曹志轩, 等. 弱电网下光伏并网系统锁相环参数自适应控制[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 52-61.
WU Haitao, ZHANG Ningning, CAO Zhixuan, et al. Adaptive control of phase-locked loop parameters of the photovoltaic grid-connected system under weak grid[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 52-61.
- [14] 肖泽坤, 涂春鸣, 肖凡, 等. 基于SVG主动调控的弱电网下VSG并网系统稳定性提升方法[J]. 供用电, 2023, 40(5): 25-33.
XIAO Zekun, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Stability improvement method of VSG grid-connected system under weak current network based on SVG active regulation[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(5): 25-33.
- [15] 刘一锋, 周小平, 洪乐荣, 等. 弱受端场景下角型链式STATCOM接入HVDC系统的阻抗建模及稳定性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1269-1279.
LIU Yifeng, ZHOU Xiaoping, HONG Lerong, et al. Impedance modeling and stability analysis for HVDC system with delta-connected cascaded STATCOM in weak receiving grid scenario[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1269-1279.
- [16] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(02): 336-349.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-339.
- [17] LI G X, MA F J, WANG Y C, et al. Design and operation analysis of virtual synchronous compensator[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3835-3845.
- [18] ZHENG X M, SONG J C, LI H Y. Research on self-synchronization strategy of grid-connected inverters in weak power grid[C]// IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 2020: 3785-3790.
- [19] ZHANG J W, ZHANG C, SHI X Q, et al. A novel energy-type SVG with grid forming control for grid voltage and inertial support[C]//

- 2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Shanghai, China, 2023: 821-828.
- [20] 张澳,王鑫达,张学广.弱电网下VSG-DFIG暂态功角稳定性分析及优化策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(22):73-81.
ZHANG Ao, WANG Xinda, ZHANG Xueguang. Transient power angle stability analysis and optimization strategy of a VSG-DFIG in a weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 73-81
- [21] 苗长新,赵文鹏,刘家明,等.基于频率超前校正的VSG并联系统有功振荡抑制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):24-35.
MIAO Changxin, ZHAO Wenpeng, LIU Jiaming, et al. Active power oscillation suppression strategy for VSG parallel systems based on frequency leading correction[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 24-35
- [22] 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, CAO Wanqi. MMC based super capacitor and battery hybrid energy storage system and hybrid synchronous control strategy[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 78-89.
- [23] 徐常天,杨兴武,刘海波,等.不平衡工况下MMC桥臂能量平衡的模型预测控制[J].电力建设,2024,45(3):78-86.
XU Changtian, YANG Xingwu, LIU Haibo, et al. Model predictive control of MMC phase leg energy balance under unbalanced condition[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 78-86.
- [24] 魏辰阳,汤广福,吴奕霖,等.高压大容量直流变压器拓扑研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2024,44(17):6940-6959.
WEI Chenyang, TANG Guangfu, WU Yilin, et al. Overview and prospect of topology research on high voltage and large capacity DC transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6940-6959.
- [25] 杨淇鸾,肖晃庆,朱琼海.基于电容电压平衡的MMC-SCES荷电状态均衡控制方法[J].浙江电力,2024,43(11):36-46.
YANG Qiluan, XIAO Huangqing, ZHU Qionghai. A SOC equilibrium control strategy for MMC-SCES based on capacitor voltage balancing[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 36-46.
- [26] 陶海波,杨晓峰,李泽杰,等.电能路由器中基于MMC的超级电容储能系统及其改进SOC均衡控制策略[J].电网技术,2019,43(11):3970-3978.
- TAO Haibo, YANG Xiaofeng, LI Zejie, et al. A modified SOC equalization control strategy of MMC based super capacitor energy storage system in electrical energy router application[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3970-3978.
- [27] 夏向阳,徐雷,易海淦,等.基于多目标递阶模型预测理论的MMC能量协同控制研究[J].太阳能学报,2022,43(10):472-481.
XIA Xiangyang, XU Lei, YI Haigan, et al. Research on energy cooperative control of mmc based on multi-objective recursive model prediction theory[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(10): 472-481.
- [28] 刘振兴,张衡,苏茜.MMC子模块电容电压波动抑制[J].电机与控制学报,2021,25(10):139-148.
LIU Zhenxing, ZHANG Heng, SU Qian. MMC sub-module capacitor voltage fluctuation suppression[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(10): 139-148.
- [29] 张明光,孙虎忠,郭日昌,等.基于准PIR的模块化多电平变流器的环流抑制策略[J].电气自动化,2021,43(1):37-40,70.
ZHANG Mingguang, SUN Huzhong, GUO Richang, et al. Circulating current restraining strategy for the modular multilevel converter based on quasi-PIR[J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 37-40, 70.
- [30] 卞凯,吴西奇,刘畅,等.模块化多电平高压直挂电池储能系统[J].电力自动化设备,2024,44(08):37-44.
BIAN Kai, WU Xiqi, LIU Chang, et al. High-voltage transformerless battery energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(08): 37-44.
- [31] 金雪芬,季建辉,李兰芳,等.面向工程应用的MMC-BESS的SOC均衡控制参数设计[J].中国电力,2023,56(11):168-176.
JIN Xuefen, JI Jianhui, LI Lanfang, et al. Parameter design of SOC balance control for MMC-BESS engineering applications[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 168-176.

(责任编辑 钱文姝)

收稿日期:2024-09-02; 修改日期:2025-02-05

作者简介:梁少辉(1998),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子建模与控制。E-mail: 107552201538stu.xju.edu.cn