MMC-HVDC 系统 MMC 内部能量控制的组网控制策略

刘英培，孙栋清
（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘 要：针对可再生能源通过电力电子设备并入电力系统，导致电网系统强度减弱、物理惯性降低的问题，文章提出一种适用于柔性直流输电（Modular Multilevel Converter Based High Voltage Direct Current，MMC-HVDC）连接弱交流系统 MMC 内部能量控制的组网控制策略。在下垂组网控制的基础上，加入惯性环节和 PI 控制环节，使得 MMC 能够自动跟踪负荷变化调整自身功率输出，实现对交流电压和频率的无差调节。针对组网控制的 MMC 内部能量波动较大的问题，设计了一种 MMC 内部能量补偿控制策略，该策略能够有效降低子模块电容电压波动。最后，基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台建立 MMC-HVDC 系统，并选取交流系统负荷增加、负荷减少两种工况，验证了所提控制策略的可行性和有效性。

关键词：MMC-HVDC；内部能量控制；组网控制；无差调节
中图分类号：TK51 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1672-08

0 引言

随着“双碳”目标的提出，可再生能源在电力系统的比例逐渐提高[1]。基于模块化多电平换流器的柔性直流输电（Modular Multilevel Converter Based High Voltage Direct Current，MMC-HVDC）技术在可再生能源并网、远距离大容量输电等方面具有显著优势[2,3]。

当电力电子设备占比不断提高，采用跟网（Grid-Following，GFL）控制策略的换流器在系统强度弱、物理惯性低的电力系统中可能引发稳定性问题[4,5]。为了应对这些挑战，国内外学者提出采用等效为电压源的组网（Grid Forming，GFM）型换流器代替等效为电流源的跟网型换流器。现有的组网控制包括下垂控制[6]、虚拟同步机控制[7]、功率同步控制[8]、虚拟振荡器控制[9]等。其中应用最为广泛的是下垂控制和虚拟同步机控制两种控制技术[10,11]。应用于 MMC-HVDC 的组网控制策略已成为当前研究热点。文献[12]为海上风电场经 MMC-HVDC 送出系统设计了一种组网控制方案，为海上风电场提供虚拟惯性和频率支持。文献[13]提出一种在交流侧故障下，具有电流限制能力的组网控制方法。文献[14]针对海上 MMC 换流站提出一种增强组网控制，增加额外的频率回路来提高海上风电场交流电压和频率的可控性。但这些文献重点在于交流电压和频率控制，直流侧控制采用环流抑制控制器（Circulating Current Suppression Controller，CCSC），未对 MMC 内部能量控制进行研究。文献[15]通过引入能量和直流侧电流的闭环控制，可以保证 MMC 控制系统稳定运行，提高系统性能。文献[16]指出，MMC 组网控制的难度在于 MMC 内部能量控制及子模块电容电压的控制。文献[17]将 MMC 内部储存能量与直流母线电压建立联系，通过控制 MMC 内部能量维持直流电压稳定。文献[18]提出一种虚拟电容控制策略，通过调控 MMC 内部储能来增大直流侧等效电容，以稳定直流电压。在此基础上，文献[19]引入了对有功功率参考值的微分优化，进一步减小了直流电压的偏差。文献[20]提出一种能量补偿控制策略来抑制低频振荡。文献[21]利用 MMC 内部能量参与交流系统频率调节。这些都是在 GFL 控制下实现的。文献 [22] 提出一种 GFM 控制与能量控制相结合的控制方案，实现了 MMC 输入功率和输出功率的解耦，通过控制 MMC 内部总能量来阻止交流侧干扰传递到直流

收稿日期：2024-10-19。
基金项目：国家自然科学基金项目(51607069)。
作者简介：刘英培(1982-)，女，博士，副教授，研究方向为直流输电、直流配电技术、新能源发电与并网技术。
E-mail：liuyingpei_123@126.com

侧。而将MMC 能量控制应用于减小子模块电容电压波动方面仍是空白。子模块电容电压波动会带来额外的电压应力,MMC 中存在成百上千的电力电子器件，任一元器件的电压应力超过限值都可能引起 MMC 电压波形畸变,甚至换流器闭锁,影响系统稳定运行。

本文针对 MMC-HVDC 连接弱交流系统,提出一种附加 MMC 内部能量控制的组网控制。首先,在传统下垂组网控制的基础上,引入惯性环节为交流系统提供惯性，引入比例积分控制环节能够无差调节交流电压和频率;然后,针对组网控制的 MMC 内部能量波动问题,分析 MMC 内部能量与共模电流的关系，设计一种 MMC 内部能量补偿控制策略,可有效降低子模块电容电压波动;最后,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台,验证了所提控制策略的有效性。

1　MMC-HVDC 系统结构及数学模型

MMC-HVDC 系统如图 1 所示。

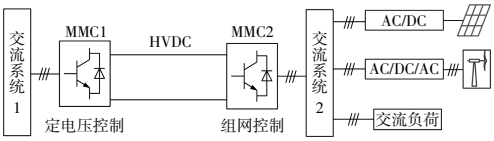


图 1　柔性直流输电系统结构

Fig.1 Structure of MMC-HVDC transmission system

由图 1 可知，交流系统 2 由于大规模光伏或风电接入,导致电力电子设备渗透率不断提高,交流系统强度减弱、惯性降低,可能引发电压、频率稳定性问题。柔直换流器 MMC2 采用组网控制策略为交流系统 2 建立同步电源,提供电压、频率支撑。MMC1 采用定直流电压控制提供能量支撑,维持直流系统稳定运行。

MMC 拓扑结构如图 2 所示。其三相结构对称,每相(j=a,b,c)包含上、下两桥臂,每个桥臂级联 N 个子模块。

图 2 中:R_f,L_f 分别为交流侧等效电阻、电抗;R_{arm},L_{arm} 分别为每个桥臂的等效电阻、电抗;v_j,i_j^{Δ} 分别为 MMC 交流侧输出电压、电流;u_j 为 j 相交流系统电压;u_{dc},i_{dc} 分别为直流侧电压、电流;v_j^{U}，v_j^{L} 分别为 j 相上、下桥臂电压;i_j^{U}，i_j^{L} 分别为流经 j 相上、下桥臂电流。

由图 2 和基尔霍夫电压定律可得:

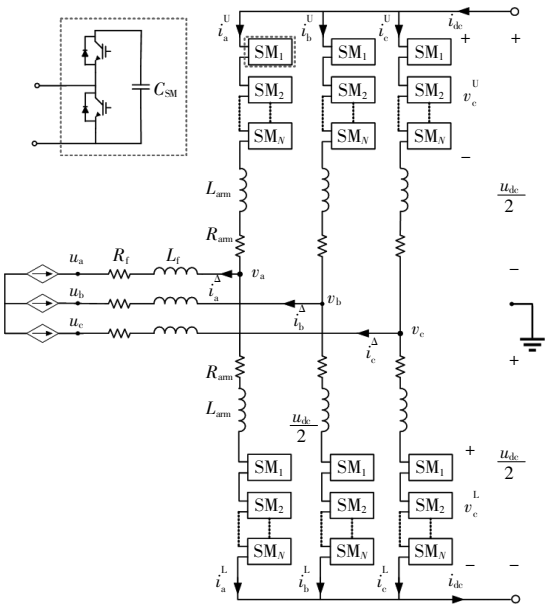


图 2　MMC 拓扑结构

Fig.2 Topological structure of MMC

$$\frac{u_{dc}}{2}=v_j^{U}+L_{arm}\frac{di_j^{U}}{dt}+R_{arm}i_j^{U}+L_f\frac{di_j^{\Delta}}{dt}+R_{arm}i_j^{\Delta}+u_j \quad (1)$$

$$\frac{u_{dc}}{2}=v_j^{L}+L_{arm}\frac{di_j^{L}}{dt}+R_{arm}i_j^{L}-L_f\frac{di_j^{\Delta}}{dt}-R_{arm}i_j^{\Delta}-u_j \quad (2)$$

由式(1),(2)可得 MMC 换流站交流侧动态特性和直流侧动态特性表达式,即:

$$v_j^{\Delta}-u_j=L_{eq}\frac{di_j^{\Delta}}{dt}+R_{eq}i_j^{\Delta} \quad (3)$$

$$\frac{u_{dc}}{2}-v_j^{\Sigma}=L_{arm}\frac{di_j^{\Sigma}}{dt}+R_{arm}i_j^{\Sigma} \quad (4)$$

式中：共模电压 $v_j^{\Sigma}=\left(v_j^{L}+v_j^{U}\right)/2$；差模电压 $v_j^{\Delta}=\left(v_j^{L}-v_j^{U}\right)/2$;共模电流 $i_j^{\Sigma}=\left(i_j^{U}+i_j^{L}\right)/2$;差模电流 $i_j^{\Delta}=i_j^{U}-i_j^{L}$;等效连接电阻 $R_{eq}=R_f+R_{arm}/2$;等效连接电感 $L_{eq}=L_f+L_{arm}/2$。

由式(3),(4)可以看出:通过对差模电压、差模电流的控制，实现了换流器与交流侧的功率传输;通过对共模电压、共模电流的控制,实现了换流器与直流侧的功率交换。

2　组网控制策略

2.1　下垂控制

在强交流系统下，系统频率和电压由并联同步发电机共同组成。而在弱交流系统下,系统频率和电压可以由采用组网控制策略的换流器组成。

传统下垂组网控制策略根据有功功率 P 与频率 ω 的近似线性关系以及无功功率 Q 与输出电压 V 的近似线性关系，通过改变注入交流系统的有功功率、无功功率来调整电压相角和幅值，表达式为

$$\begin{cases}\omega=\omega^*+K_p(P^*-P)\\ V=V^*+K_q(Q^*-Q)\end{cases} \tag{5}$$

式中：K_p，K_q 分别为 P/ω 下垂环、Q/V 下垂环的下垂系数；ω^*，V^* 分别为频率、电压的参考值。

有功功率 P 和无功功率 Q 的瞬时值是根据交流系统电压和电流计算得到的，其表达式为

$$\begin{cases}P=1.5\left(u_d\dot{i}_d^{\Delta}+u_q\dot{i}_q^{\Delta}\right)\\ Q=1.5\left(u_d\dot{i}_q^{\Delta}-u_q\dot{i}_d^{\Delta}\right)\end{cases} \tag{6}$$

传统下垂组网控制的原理类似于模拟同步发电机一次调频、一次调压，这种控制属于有差控制，不能实现对频率、电压的无差调节，并且换流器不能为交流系统提供惯性。本文引入低通滤波器(Low Pass Filter，LPF)和比例积分(PI)控制器来改进 P/ω 下垂环、Q/V 下垂环。LPF 既可以滤除功率测量噪声，又使得 P 到 P^* 的闭环传递函数和 Q 到 Q^* 的闭环传递函数变为二阶，为系统提供惯性。PI 控制环节可以实现对交流系统频率、电压的无差调节。改进 P/ω 下垂、Q/V 下垂控制框图如图 3，4 所示。

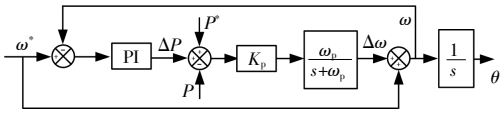


图 3 改进 P/ω 下垂控制框图

Fig.3 Improved P/ω droop control block

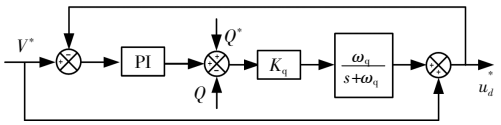


图 4 改进 Q/V 下垂控制框图

Fig.4 Improved Q/V droop control block

根据图 4，5 可以推出：

$$\begin{cases}\omega=\omega^*+\dfrac{P^*-P}{\dfrac{s+\omega_p}{K_p\omega_p}+k_{p\omega}+\dfrac{k_{i\omega}}{s}}\\ V=V^*+\dfrac{Q^*-Q}{\dfrac{s+\omega_q}{K_q\omega_q}+k_{pv}+\dfrac{k_{iv}}{s}}\end{cases} \tag{7}$$

式中：ω_p，ω_q 分别为 P/ω 下垂环、Q/V 下垂环低通滤波器截止频率。

由式(7)可知，由于存在 PI 控制器，当 t 趋近于无穷时，s 趋近于 0，此时等式右边第二项趋近于 0。即稳态时 $\omega=\omega^*$ 且 $V=V^*$，因此可以实现交流系统频率和电压的无差调节。

2.2 内环控制

为了实现对电压、电流的快速控制，引入电压、电流内环，其结构如图 5 所示。

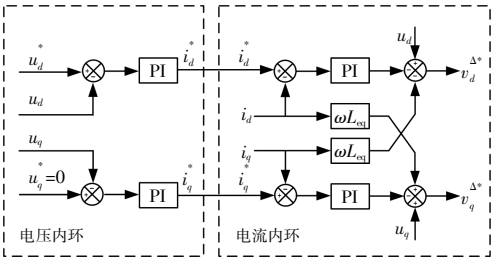


图 5 内环控制框图

Fig.5 Inner loop control block

由图 5 可知，电压内环和电流内环都是在 dq 坐标系下实现，坐标变换的角度由 P/ω 下垂环提供。电压内环负责调节 MMC 输出电压跟踪 P/ω 下垂环、Q/V 下垂环输出的电压幅值及相位，参考电压和实际电压之间的误差作为电压内环的输入，其输出为 MMC 输出电流参考值。电流内环负责跟踪电压内环提供的参考电流，以调节 MMC 输出电流。值得注意的是，MMC 交流侧没有滤波电容，因此电压内环没有耦合项。

3 MMC 能量控制策略

3.1 共模电流与 MMC 内部能量关系

根据图 2，对上、下桥臂应用基尔霍夫电压定律，可得其电压表达式为

$$\begin{cases}v_j^{U}=\dfrac{u_{dc}}{2}-v_j-u_j^{\Sigma}\\ v_j^{L}=\dfrac{u_{dc}}{2}+v_j-u_j^{\Sigma}\end{cases} \tag{8}$$

换流器 j 相上、下桥臂能量瞬时变化率表达式为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}W_j^{U}}{\mathrm{d}t}=v_j^{U}\dot{i}_j^{U}=\left(\dfrac{u_{dc}}{2}-v_j-u_j^{\Sigma}\right)\left(i_j^{\Sigma}+\dfrac{\dot{i}_j^{\Delta}}{2}\right)\\ \dfrac{\mathrm{d}W_j^{L}}{\mathrm{d}t}=v_j^{L}\dot{i}_j^{L}=\left(\dfrac{u_{dc}}{2}+v_j-u_j^{\Sigma}\right)\left(i_j^{\Sigma}-\dfrac{\dot{i}_j^{\Delta}}{2}\right)\end{cases} \tag{9}$$

换流器 j 相上、下桥臂能量和表达式为

$$W_j^{\Sigma}=W_j^{U}+W_j^{L} \tag{10}$$

将式(9)代入式(10)可以得到上、下桥臂能量

和的瞬时表达式为

$$\frac{\mathrm{d}W_j^{\Sigma}}{\mathrm{d}t}=u_{\mathrm{dc}}i_j^{\Sigma}-2u_j^{\Sigma}i_j^{\Sigma}-v_ji_j^{\Delta} \tag{11}$$

由式(11)可知,等式右边前两项为 MMC 与直流线路交换功率，等式右边第三项为 MMC 与交流侧交换功率。前两项与共模电流有关,共模电流中除了用于正常功率传输的直流分量，还存在使能量发生振荡的谐波分量。因此可以通过控制共模电流的谐波分量来减小 MMC 内部能量振荡,从而减小子模块电容电压波动。

3.2　能量控制策略

共模电流主要由直流分量和负序二倍频谐波分量组成，其直流分量用于 MMC 与直流侧功率交换，正常时三相共模电流直流分量的和为总的直流电流 i_{dc}；二倍频谐波分量用于相与相之间交换能量,是引起能量振荡的主要因素,因此可以控制共模电流的二倍频分量来实现对 MMC 能量控制。

j 相上、下桥臂存储能量与上、下桥臂电容电压的关系可以表示为

$$\begin{cases} W_j^{\mathrm{U}}=\dfrac{C_{\mathrm{SM}}\left(v_j^{\mathrm{U}}\right)^2}{2N} \\ W_j^{\mathrm{L}}=\dfrac{C_{\mathrm{SM}}\left(v_j^{\mathrm{L}}\right)^2}{2N} \end{cases} \tag{12}$$

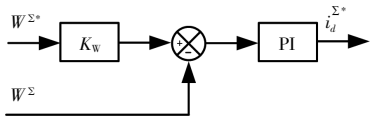
由式(10)和式(12)可知,通过减小 W_j^{Σ} 波动,达到减小 W_j^{U},W_j^{L} 的波动,进而可以减小上、下桥臂电压 v_j^{U},v_j^{L} 的波动，即减小子模块电容电压波动。

采用传统 CCSC 的 MMC 内部能量不受控制,其内部能量取决于 MMC 与交流侧或直流侧交换功率。本文提出一种能量补偿控制策略,通过控制共模电流二倍频分量使 MMC 内部总能量跟踪能量参考值,进而调整存储在子模块电容中的能量。能量补偿控制在负序二倍频 dq 坐标系下实现,坐标变换的角度由 P/ω 下垂环提供。能量控制环节由能量外环和电流内环组成,如图 6 所示。

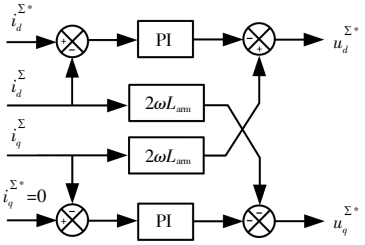
一个周期内 j 相上、下桥臂能量和计算式为

$$W_j^{\Sigma}=\int_{t-T}^{t}\left(v_j^{\mathrm{U}}i_j^{\mathrm{U}}+v_j^{\mathrm{L}}i_j^{\mathrm{L}}\right)\mathrm{d}t \tag{13}$$

能量补偿控制表达式为



(a)能量外环控制



(b)共模电流内环控制框图

图 6　MMC 内部能量控制结构

Fig.6 MMC internal energy control block

$$i_d^{\Sigma*}=\left(K_{\mathrm{W}}W^{\Sigma*}-W^{\Sigma}\right)\left(k_{\mathrm{pw}}+\frac{k_{\mathrm{iw}}}{s}\right) \tag{14}$$

式中:K_{W} 为补偿系数,且 K_{W} 取值应当大于 1。

当选取不同 K_{W} 时，子模块电容电压幅值减小效果不同。通过仿真检验不同补偿系数的影响,基于PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台，建立了图 1 的 MMC-HVDC 系统仿真模型，系统主要参数如表 1 所示。

表 1　MMC-HVDC 系统主参数

Table 1 Main parameters of MMC-HVDC network

参数	数值
MMC 额定直流电压/kV	640
MMC 额定交流电压/kV	320
额定功率/MVA	600
每个桥臂子模块数/个	100
平均子模块电压/kV	6.4
子模块电容/mF	10
R_{arm}/Ω	0.4
L_{arm}/mH	50
R_{f}/Ω	0.08
L_{f}/mH	32
直流线路长度/km	200

图 7 为不同补偿系数下子模块电压波形。

由图 7 可以看出，采用能量补偿控制可以明显减小子模块电容电压波动。随着 K_{W} 增大,子模块电容电压幅值减小,但当 K_{W}>1.12 时,子模块电容电压出现新的振荡，并且此时再继续增大 K_{W},对子模块电容电压幅值抑制效果不明显，因此在此系统参数组合下,K_{W} 最佳取值为 1.12。

本文所提附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略包括交流侧控制和直流侧控制。交流侧控

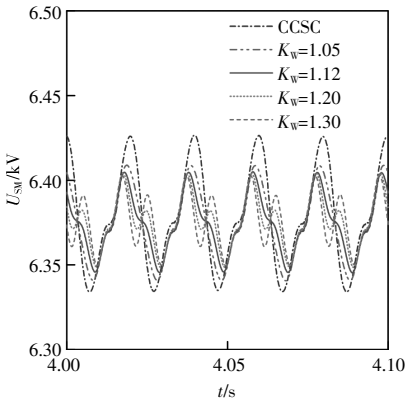


图 7 不同补偿系数下子模块电容电压

Fig.7 Capacitance voltages of submodules with different compensation coefficients

制策略为组网控制,实现交流系统频率、电压的无差调节。直流侧控制策略为附加能量控制。附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略整体框图如图 8 所示。

4 仿真结果分析

为了验证本文所提控制策略的有效性，基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台，建立了 MMC-HVDC 系统仿真模型（图 1）。送端换流站 MMC1 采用定直流电压控制,MMC2 采用本文提出的附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略，受端交流系统为弱交流系统，系统的主要参数如表 1 所示。

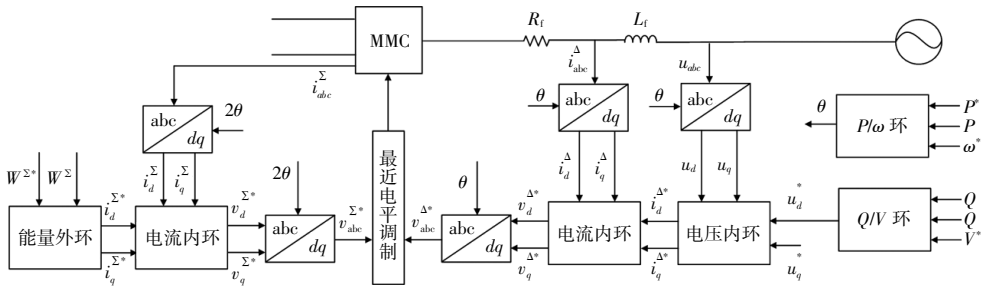
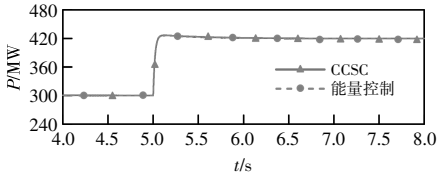


图 8 附加 MMC 内部能量控制的组网控制

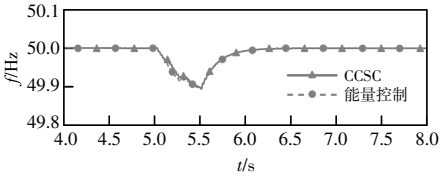
Fig.8 MMC grid-forming control with internal energy control

4.1 交流系统负荷增加

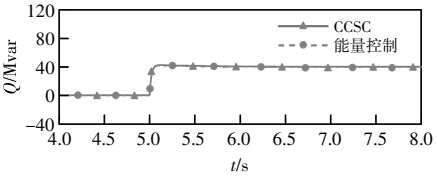
在 t=5 s 时，交流系统 2 有功负荷增加 120 MW、无功负荷增加 40 Mvar，在本文所提附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略和采用 CCSC 的组网控制策略下，有功功率、交流系统 2 的频率、无功功率、交流电压有效值、MMC 子模块电容电压以及 MMC 内部能量的变化曲线如图 9 所示。



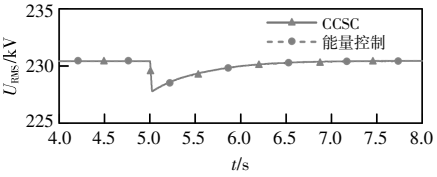
(a)有功功率



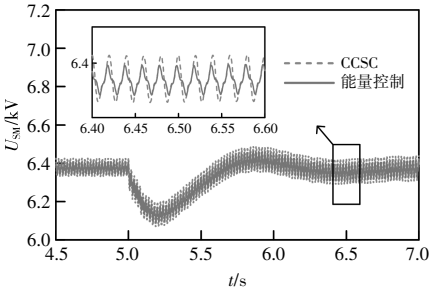
(b)交流系统频率



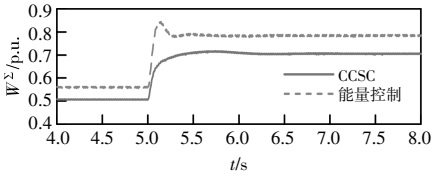
(c)无功功率



(d)交流电压有效值



(e)MMC 子模块电容电压



(f)MMC 内部能量

图 9　交流负荷增加系统仿真结果

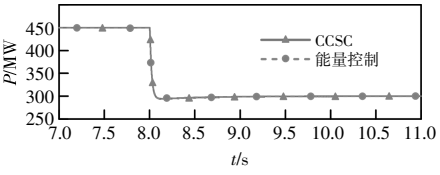
Fig.9 Simulation results of AC system load increasing

由图 9(b)可知,当交流侧负荷从 300 MW 突增到 420 MW 后，由于组网控制环节无法及时响应,MMC 输出功率小于负荷功率，功率不平衡导致交流系统频率下降。在组网控制策略作用下,MMC 输出有功功率增加,频率恢复至 50 Hz,实现了频率的无差调节。由图 9(d)可知,交流负荷从 0 Mvar 突增到 40 Mvar,导致交流电压下降,在组网控制策略的作用下交流电压恢复至额定值,实现了交流电压的无差调节。与传统 CCSC 控制策略相比，本文所提 MMC 内部能量控制策略频率最大偏移量为 0.11 Hz,交流电压有效值最大偏移量为 2.7 kV，表明能量控制环节不会影响组网控制环节对交流系统频率、电压的控制效果。由图 9(e),(f) 可知，通过 MMC 内部能量控制器控制 MMC 内部能量,可以减小 MMC 子模块电容电压的波动。稳态时,未采用能量控制子模块电容电压波动为 6.332 k~6.425 kV,采用能量控制子模块电容电压波动为 6.345 k~6.405 kV。对于所模拟的情况，采用 MMC 内部能量控制策略子模块电容电压波动减少 35%。

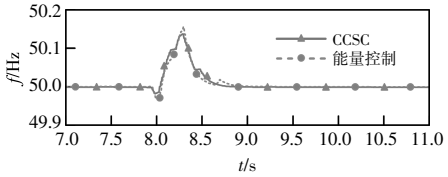
4.2　交流系统负荷减少

在 t=8 s 时,交流系统 2 有功负荷由 450 MW 减小到 300 MW、无功负荷由 30 Mvar 减少到 0 Mvar，在本文所提附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略和采用 CCSC 的传统组网控制策略下,有功功率、交流系统 2 的频率、无功功率、交流电压有效值、MMC 内部能量以及 MMC 子模块电容电压的变化曲线如图 10 所示。

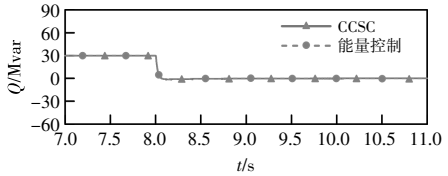
由图 10(b)可知,当交流侧有功负荷突然减少 150 MW 后,由于组网控制环节来不及响应,导



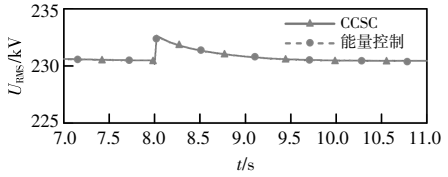
(a)有功功率



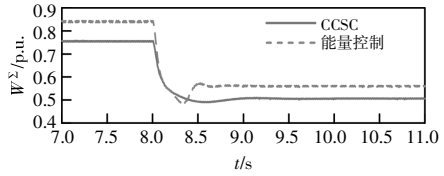
(b)交流系统 2 频率



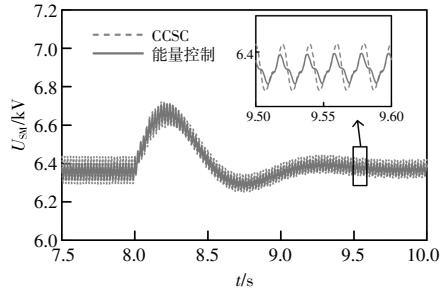
(c)无功功率



(d)交流电压有效值



(e)MMC 内部能量



(f)MMC 子模块电容电压

图 10　交流负荷增加系统仿真结果

Fig10 Simulation results of AC system load increasing

致 MMC 输出功率大于负荷功率，交流系统频率上升。在组网控制策略作用下,MMC 输出有功功率降低,频率恢复至 50 Hz,实现了频率的无差调节。由图 10(d)可知,交流侧无功负荷突然减少 30 Mvar,导致交流电压下降,在组网控制策略的作用下交流电压恢复至额定值，实现了交流电压的无差调节。对比本文所提 MMC 内部能量控制策略与传统 CCSC 控制策略，频率最大偏移量分别为 0.16,0.14 Hz，交流电压有效值最大偏移量均为 2.27 kV,能量控制不会影响组网控制对交流系统频率、电压的控制效果。由图 10(e),(f)可知,

通过 MMC 内部能量控制器控制 MMC 内部能量，可以减小 MMC 子模块电容电压的波动。稳态时，未采用能量控制子模块电容电压为6 295~6 436 V，采用能量控制子模块电容电压为 6 315~6 402 V。对于所模拟的情况，采用本文所提附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略，子模块电容电压波动降低 38%。

5 结论

本文针对 MMC-HVDC 连接弱交流系统提出了一种附加 MMC 内部能量控制的组网控制策略。并借助 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建 MMC-HVDC 系统进行仿真，得出以下结论。

①本文所提控制策略能够在正常工作和负荷突变情况下，为弱交流系统提供稳定的频率和电压参考。当交流侧负荷突然增加或减少时，在组网控制环节的作用下，交流电压和频率变化都能快速恢复至额定值，实现无差调节。

②本文所提 MMC 能量补偿控制策略在抑制子模块电容电压波动方面有明显效果，减小子模块电容电压波动能够减小电压峰值，从而减小电压应力，有利于提升系统运行稳定性；同时有利于实现 MMC 平台的紧凑化，减小换流站的建设成本。

参考文献：

[1] 李晖，刘栋，姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判 [J]. 中国电机工程学报，2021，41(18)：6245-6259.

[2] 戴腾飞，茅靖峰，吴爱华，等.分布式光储直流微电网滑模自抗扰鲁棒运行控制 [J]. 可再生能源，2022，40(11)：1505-1514.

[3] 杨鹏，刘锋，姜齐荣，等.“双高”电力系统大扰动稳定性：问题、挑战与展望[J].清华大学学报(自然科学版)，2021，61(5)：403-414.

[4] 卓振宇，张宁，谢小荣，等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.

[5] Markovic U，Stanojev O，Aristidou P，et al.Partial grid forming concept for 100% inverter-based transmission systems [A].2018 IEEE Power Energy Society General Meeting(PESGM)[C].Portland：IEEE，2018.1-5.

[6] Guan M，Pan W，Zhang J，et al.Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations[J].IEEE Transactions on Power Systems，2015，30(6)：3093-3101.

[7] Zhang L，Harnefors L，Nee H P.Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J].IEEE Transactions on Power Systems，2010，25 (2)：809-820.

[8] Yu H，Awal M A，Tu H，et al.Comparative transient stability assessment of droop and dispatchable virtual oscillator controlled grid-connected inverters [J].IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(2)：2119-2130.

[9] Pan D，Wang X，Liu F，et al.Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control：a design-oriented study[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2020，8 (2)：1019-1033.

[10] D’arco S，Suul J A.Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2014，5(1)：394-395.

[11] Adeuyi O D，Cheah-mane M，Liang J，et al.Frequency support from modular multilevel converter based multi-terminal HVDC schemes [A].2015 IEEE Power Energy Society General Meeting[C].Denver：IEEE，2015.1-5.

[12] Freytes J，Li J，De Préville G，et al.Grid-forming control with current limitation for MMC under unbalanced fault ride-through [J].IEEE Transactions on Power Delivery，2021，36(3)：1914-1916.

[13] Jing Y，Li R，Xu L，et al.Enhanced AC voltage and frequency control of offshore MMC station for wind farm connection [J].IET Renewable Power Generation，2018，12(15)：1771-1777.

[14] Freytes J，Bergna G，Suul J A，et al.Improving small-signal stability of an MMC with ccsc by control of the internally stored energy [J].IEEE Transactions on Power Delivery，2018，33(1)：429-439.

[15] 艾小清，袁旭峰，熊炜，等.柔直配电系统混合型 MMC 可靠性评估[J].电测与仪表，2023，60(9)：88-95.

[16] Samimi S，Gruson F，Delarue P，et al.MMC stored energy participation to the DC bus voltage control in an HVDC link [J].IEEE Transactions on Power Delivery，2016，31(4)：1710-1718.

[17] Shinoda K，Benchaib A，Dai J，et al.Virtual capacitor control：mitigation of DC voltage fluctuations in MMC-Based HVDC systems [J].IEEE Transactions on Power Delivery，2018，33(1)：455-465.

[18] Freytes J，Akkari S，Rault P，et al.Dynamic analysis of

MMC -Based MTDC grids:use of MMC energy to improve voltage behavior[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(1):137-148.

[19] 翟冬玲,韩民晓,Das Mukesh Kumar,等.用于低频振荡抑制的 MMC 的能量补偿控制[J].中国电机工程学报,2019,39(10):2864-2875.

[20] 申志鹏,熊会,朱介北,等.影响特高压直流输电工程安全高效运行评估因素集的建模与分析[J].发电技术,2021,42(1):48-59.

[21] Sanchez-Sanchez E,Prieto-Araujo E,Gomis-Bellmunt O.The role of the internal energy in MMCs Operating in grid-forming mode [J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2020,8(2):949-962.

[22] Deng F,Chen Z,Khan M R,et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(5):2721-2732.

Grid-forming control strategy for MMC-HVDC system with MMC internal energy control

Liu Yingpei, Sun Dongqing

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: More and more renewable energy is incorporated into the power system through power electronic equipment, resulting in reduced system strength and physical inertia. This paper proposes a grid-forming control strategy for modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system (MMC-HVDC) with MMC internal energy control which is connected with a weak AC system. Firstly, based on the droop grid-forming control,, inertia link and PI control are added, so that MMC can automatically track the load fluctuation and adjust its own power output, and realize zero steady-state error regulation of AC voltage and frequency. Then, aiming at the problem of internal energy fluctuation of MMC controlled by grid-forming control, a MMC internal energy compensation controller is designed, which can effectively reduce fluctuation of DC voltage of submodule capacitance. Finally, based on the PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation platform, a MMC -HVDC transmission system was established, and two operating conditions of AC grid load increase and AC grid load reduction are selected to verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: MMC-HVDC; internal energy control; grid-forming control; zero steady-state error regulation