

# MMC – MTDC 输电系统频率协调控制策略

杨林<sup>1</sup>, 邓鸿强<sup>1</sup>, 邓云仁<sup>1</sup>, 陈浩<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000;

2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对交流系统通过 MMC – MTDC 实现异步联网后无法实现区域间频率支撑的问题, 参照交流系统功 – 频特性和柔性直流输电系统直流电压下垂特性设计了 3 种频率协调控制策略: 固定频率控制、频率偏差 PI 控制和功率估算频率控制。固定频率控制将频率参考值设定为常数来获得功率支撑量; 频率偏差 PI 控制是将频率事故换流站的频率与参与协调控制换流站的频率平均值之差作为 PI 控制器的输入量来获取功率支撑量; 功率估算频率控制根据事故换流站交流侧频率的实时变化, 利用功 – 频静特性系数估算功率变化量来决定换流站的功率支撑量。在 PSCAD 仿真软件中搭建了异步联网交流系统进行仿真验证, 仿真结果表明了所提 3 种利用 MMC – MTDC 实现区域间频率协调的可行性和有效性。

**关键词:** MMC – MTDC; 频率协调控制; 电压下垂控制; 固定频率控制; 频率偏差控制; 功率估算; 功频静特性系数

**中图分类号:** TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 – 6954(2019)01 – 0006 – 08

**DOI:** 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.002

## Frequency Coordinated Control Strategy for MMC – MTDC Transmission System

Yang Lin<sup>1</sup>, Deng Hongqiang<sup>1</sup>, Deng Yunren<sup>1</sup>, Chen Hao<sup>2</sup>

(1. State Grid Nanchong Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** The problem of inter – area frequency support can not be achieved after asynchronous networking is realized through MMC – MTDC. Referring to the power – frequency characteristics of AC system and the DC voltage droop characteristics of flexible HVDC system, 3 frequency coordinated control strategies are designed: fixed frequency control, frequency deviation PI control and power estimation frequency control. Fixed frequency control sets frequency reference value as the constant to obtain power support. The frequency deviation PI control obtains the power support by taking the frequency of converter station with frequency accident and the difference of the average frequency of the coordinated control converter station as the input of PI controller. The power estimation frequency control is based on the instantaneous change of the frequency of AC side of the accident converter station. And the power – frequency characteristic coefficient is used to estimate the power variation to determine the power support of the converter station. In PSCAD simulation software, an asynchronous networking system is set up for simulation verification, and the simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed 3 methods to achieve inter – area frequency coordinated control.

**Key words:** MMC – MTDC; frequency coordinated control; voltage droop control; fixed frequency control; frequency deviation control; power estimation; power – frequency characteristic coefficient

## 0 引言

在实现交流系统异步连接和新能源大规模集中功率送出等方面, 基于模块化多电平换流器的多端

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904600)

直流系统是一套具有前景的解决方案<sup>[1-2]</sup>。多端系统在增加系统传输容量、对所连接的交流系统实现无功支撑、提升区域频率稳定和加强交流系统暂态稳定等方面都具有很大的优势<sup>[3-5]</sup>。为了克服远方新能源发电区域与负荷中心的长距离输电容量的挑

战, MMC - MTDC 技术提供了高效灵活可控的大容量传输解决方案。此外,未来不同国家和地区的电力系统互联可由 MMC - MTDC 技术不断提升传输容量得以实现,这为不同国家和区域的能源交易市场铺平了道路,例如中国的张北直流工程和欧洲超级电网工程。MMC - MTDC 不仅能够交换确定的传输容量,而且当交流系统功率不平衡导致频率不稳定时,可以利用其实现异步交流系统的旋转储备功率交换来提升系统频率稳定。这个特点使其在传统电厂大量退出和新能源集中接入电网的新时代电力系统背景下扮演了十分重要的角色。下面的研究重点是基于 MMC - MTDC 提出不同的附加频率控制策略来提升交流系统的频率稳定。

考虑到 MTDC 输电网络的容量传输等级相对较大,因此异步交流网络可以通过 MTDC 系统来实现一次频率的调整。目前已经有大量基于 VSC 型平均值换流器模型进行一次频率调整的研究文献, VSC - HVDC 通常输出为两电平,直流侧单一的直流电容对直流电压的动态特性影响较大。此外,平均值模型的交直流侧功率平衡是直接耦合的,而 MMC 结构中大量子模块电容的储能作用可以认为交直流侧功率是解耦的。文献 [6 - 8] 中介绍了 MTDC 输电系统的实时功率平衡是通过直流电压下垂控制策略来实现的,直流电压下垂控制策略的优势在于,当网络中潮流出现较大的波动时,如一个换流站退出运行,其可以利用多个换流站来分担不平衡功率。这也为风电场利用 MTDC 进行功率输送时解决功率波动提供了一个较好方案。文献 [9] 在 VSC - MTDC 控制器中引入了直流电压下垂与频率下垂控制结构,该策略易于通过 MTDC 实现异步联网交流系统的一次频率调整。文献 [10] 研究了 VSC - HVDC 在异步电网中的频率调节功能,分别讨论了固定频率控制、直流电压 - 频率控制、功率 - 频率控制 3 种控制方法,对通过 MTDC 连接的异步电网的频率协调控制具有借鉴和指导意义。文献 [11] 针对 MMC - HVDC 提出了 4 种频率一次调整控制策略,然而该策略在 MTDC 系统中会使得定直流电压的换流站承担所有的不平衡功率,在多端系统中该策略会威胁系统的稳定运行。

针对 MMC - MTDC 直流电网参与异步交流系统一次频率调整的文献较少以及目前的文献侧重于两端系统频率附加控制策略的研究,就 MMC - MT-

DC 输电系统提出了 3 种频率协调控制策略来实现异步交流区域的功率支撑和频率协调。

## 1 测试系统

为了研究基于 MMC - MTDC 输电系统的频率协调控制策略,在文献 [12 - 14] 的 IEEE 39 节点系统基础上进行改进,如图 1 所示。图中删除了部分交流线路,原来的系统分离成由 MMC - MTDC 连接的 4 个异步交流系统。改进后的交直流系统是由 345 kV 的交流输电网和 500 kV 的四端直流电网共同构成,4 个换流站分别连接于母线 5、母线 6、母线 17、母线 26。仿真平台相关系统模块说明如下:

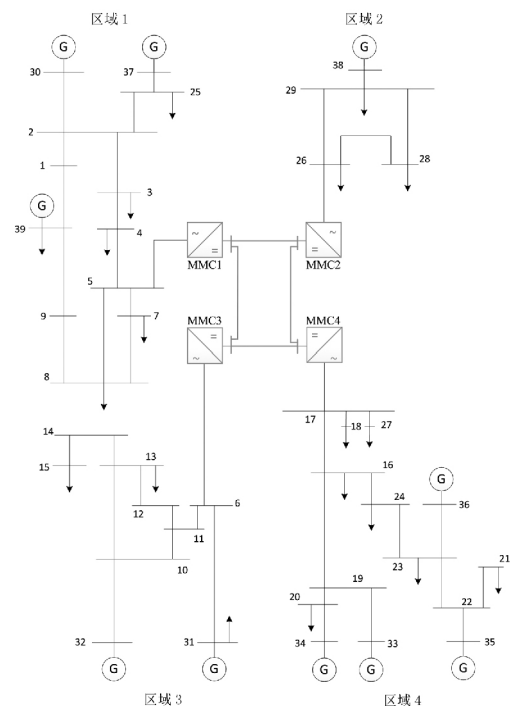


图 1 含有 MMC - MTDC 的改进 IEEE 39 节点系统

- 1) 每个发电机采用 dq0 坐标系下的模型进行研究,且发电机的机械系统运用单质量块进行等值;
- 2) 每个发电机的调速器和涡轮机单元采用仿真软件中的 HGOV18 模型;
- 3) 交直流系统的线路采用 Bergeron 模型;
- 4) 发电机励磁系统采用 IEEE DC1A 型模型;
- 5) 负荷采用式 (1) 的模型进行等值。

$$\begin{cases} P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_p} \cdot (1 + K_{PF} \cdot dF) \\ Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_Q} \cdot (1 + K_{QF} \cdot dF) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P$ 、 $Q$ 、 $V$  为有功功率、无功功率、交流电压;  $P_0$ 、 $Q_0$ 、 $V_0$  为额定有功功率、额定无功功率、额定电压;  $N_p$  和  $N_q$  为有功、无功的电压因子;  $K_{PF}$  和  $K_{QF}$  为有功、无功的频率因子。取  $N_p = N_q = 2$   $K_{PF} = K_{QF} = 0$ 。

## 2 MMC 数学模型

MMC 型换流站的桥臂由上百个子模块构成,在系统仿真时需要大量的计算时间。交直流系统研究中为了加快仿真速度和节省仿真空间,通常采用文献[15]的 CIGRE B4.57 导则中 Type 4 模型。该模型将所有桥臂的子模块输出电压用受控电压源进行等效,交直流物理量如图 2 所示。这里 MMC 的控制结构参照文献[16-17]中 VSC-MTDC 的频率协调控制结构,为此可以在 MMC-MTDC 的相关控制结构中引入一次频率调制的附加控制策略。

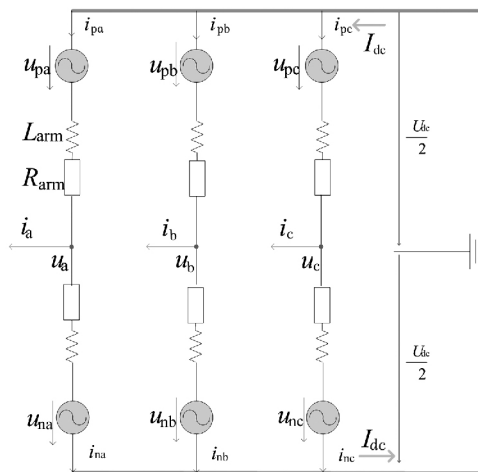


图2 MMC 等值电路

根据图 2 的等值电路列写基尔霍夫电流、电压定律(下标  $i = a, b, c$ ):

$$i_i = i_{pi} - i_{ni} \quad (2)$$

$$u_i + u_{pi} + R_{arm} i_{pi} + L_{arm} \frac{di_{pi}}{dt} = \frac{1}{2} U_{dc} \quad (3)$$

$$u_i - u_{ni} - R_{arm} i_{ni} - L_{arm} \frac{di_{ni}}{dt} = -\frac{1}{2} U_{dc} \quad (4)$$

式中:  $i_p$ 、 $i_n$  为换流器上、下桥臂电流;  $u_p$ 、 $u_n$  为换流器上、下桥臂电压;  $R_{arm}$ 、 $L_{arm}$  为桥臂电阻和桥臂电感;  $u_i$ 、 $i_i$  为交流侧输出电压、电流;  $U_{dc}$  为直流电压。

联立式(2)至式(4),定义内部电流为  $i_z$ ,交流侧控制电压为  $u_\Delta$ ,直流侧控制电压为  $u_z$ ,可得

$$i_z = (i_{pi} + i_{ni}) / 2 \quad (5)$$

$$u_{\Delta i} = \frac{u_{ni} - u_{pi}}{2} = u_i + \frac{1}{2} R_{arm} i_i + L_{arm} \frac{di_i}{dt} \quad (6)$$

$$u_{zj} = \frac{u_{ni} + u_{pi}}{2} = \frac{1}{2} U_{dc} - R_{arm} i_z - L_{arm} \frac{di_z}{dt} \quad (7)$$

在同步旋转 dq 坐标系下,交流侧的功率通过控制  $u_\Delta$  来实现对交流电流  $i_i$  的控制,而直流侧的功率和电压通过  $u_z$  来调整内部电流  $i_z$  的零序成分(稳态下  $3i_{z0} = I_{dc}$ )。换流站与 PCC 点之间换流变压器的 Y/ $\Delta$  连接方式使得换流站阀侧交流电流的零序分量不存在,剩余分量通过 Clarke 变换获得电流的水平分量和垂直分量<sup>[18]</sup>。根据瞬时无功功率理论,可得交直流交换的功率在 dq 坐标下的有功和无功为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (U_{sd} i_d + U_{sq} i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (U_{sd} i_q - U_{sq} i_d) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_{sd}$ 、 $i_{sd}$  为派克变换后的 d 轴电压、电流;  $U_{sq}$ 、 $i_{sq}$  为派克变换后的 q 轴电压、电流。

为了达到设定的功率运行点,MMC 外环控制器的电流分量由式(9)进行调整。

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}^* u_{dm} - Q_{ref}^* u_{qm}}{u_{dm}^2 + u_{qm}^2} \\ i_{qref} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}^* u_{qm} + Q_{ref}^* u_{dm}}{u_{dm}^2 + u_{qm}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{ref}^*$ 、 $Q_{ref}^*$  为通过调整后的有功和无功的参考值;  $u_{dm}$ 、 $u_{qm}$  为实时测量交流电压经派克变换后的 d、q 轴分量。有功功率的运行点  $P_{ref}^*$  通过前馈 PI 控制获得

$$P_{ref}^* = P_{ref} + (K_p + K_i / s) (P_{ref} - P_{refm}) \quad (10)$$

式中:  $P_{refm}$  为 PCC 点测量的有功功率;  $P_{ref}$  为有功功率参考值;  $K_p$ 、 $K_i$  为比例积分系数。有功功率的参考值是通过调度中心给定,为了使 MMC 换流站参与频率的调整,可以在外环控制器中叠加一个关于频率的功率分量。

## 3 交流系统的一次频率调整

交流电网的频率稳定是所有交流电网稳定运行的前提,发电机组和负荷之间功率暂态平衡通过频率变化来反应。不考虑严重情况下的二次调频,交流电网的一次频率调整是通过主调频发电厂调速器的频率下垂控制来实现的,其控制原理是将频率作为全局变量来平衡交流电网的功率交换。

发电机的频率下垂控制结构如图 3 所示,其详

细的下垂特性和结构参考文献 [19 - 20]。频率下垂系数  $\rho_{ac}$  的大小表示发电机在交流电网功率不平衡导致频率偏移时的补偿能力。在图 5 中, 频率下垂系数越小, 交流系统就越强。典型的频率下垂系数为 0.04 ~ 0.08 p. u.。

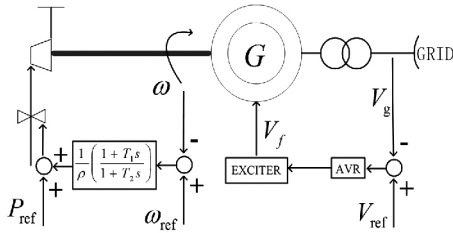


图 3 发电机组频率下垂控制

交流电网中频率响应与发电机和负荷的调节特性相关, 其功率静态特性曲线如图 4 所示。交流电网初始运行点 A, 由于负荷的变化, 经过功频调整后运行于 B, 其功率增量为

$$\Delta P_{D0} = -(K_C + K_D) \Delta f = -K \Delta f \quad (11)$$

式中:  $K_C$ 、 $K_D$ 、 $K$  分别为发电机功频静态特性系数、负荷频率调节效应系数以及交流系统功频静态特性系数。

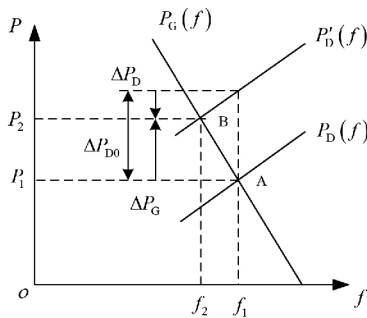


图 4 交流系统功率 - 频率静态特性

## 4 MMC - MTDC 一次频率协调控制策略

通过多端系统连接的异步交流电网, 如果采用主从控制策略, 则只有一个换流站控制整个直流网络的直流电压(该换流站母线称为松弛节点)。交流系统出现频率变化时, 采用定功率的 MMC 不能对频率变化进行响应, 为此在功率参考值中引入频率变化带来的功率变化量  $\Delta P_F$ , 可以使 MMC 换流站参与交流系统的一次频率调整。如果交流系统的频率偏差过大, 则可以通过 MTDC 系统实现异步电网功率支撑和频率稳定。MTDC 系统中实现区域功

率支撑需要引入直流电压下垂控制策略, 其工作原理与交流系统中发电机的功频静态特性相似, 将会产生一个与直流电压相关的功率变化量  $\Delta P_{DC}$ 。

### 4.1 直流电压下垂控制

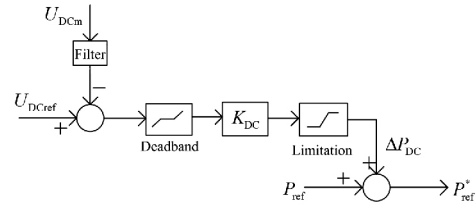


图 5 直流电压下垂控制结构

直流电压下垂控制策略中测量电压  $U_{DCm}$  与参考电压  $U_{DCref}$  的差值乘以一个电压下垂系数  $K_{DC}$ , 从而获得一个附加功率输出量  $\Delta P_{DC}$ , 其具有比例特性。调整功率  $P_{ref}^*$  通过前馈的方式送入 MMC 换流站的外环有功功率控制器中。结构如图 5 所示。

$$\Delta U_{DC} = U_{DCref} - U_{DCm} \quad (12)$$

$$\Delta P_{DC} = K_{DC} \Delta U_{DC} \quad (13)$$

采用直流电压下垂的换流站共同协调网络的直流电压, 当直流网络中出现不平衡功率时, 以直流电压作为纽带, 通过换流站的下垂系数来实现不平衡功率在换流站之间的分配, 从而减轻了主从控制中直流电压站的负担。

### 4.2 频率协调控制策略

#### 4.2.1 固定频率控制

固定频率控制策略类似于传统同步发电机的一次频率调整。实际测量到的换流站 PCC 点的频率  $f_{PCCm}$  与额定固定参考频率  $f_{ref}$  的偏差乘以一个下垂系数  $K_F$ , 得到一个具有比例特性的额外功率增量  $\Delta P_F$ , 这个功率增量叠加至 4.1 中直流电压下垂的输出量中, 即可得到新的功率增量, 从而实现了 MT-DC 系统的电压下垂和频率下垂控制, 其结构如图 6 所示。

采用固定频率控制策略, 通常对于一个具有较高短路比的强交流系统来说, 当交流系统出现较大的功率不平衡情况时, 通过 MMC - MTDC 可以很好地支撑弱交流系统的稳定。通常额定频率在标么制下设为  $f_{ref} = 1$ , 此时式 (10) 中的功率参考值由式 (16) 进行更新。

$$\Delta f = f_{ref} - f_{PCCm} \quad (14)$$

$$\Delta P_F = K_F \Delta f \quad (15)$$

$$P_{ref}^* = P_{ref} - K_F \Delta f + K_{DC} \Delta U_{DC}$$

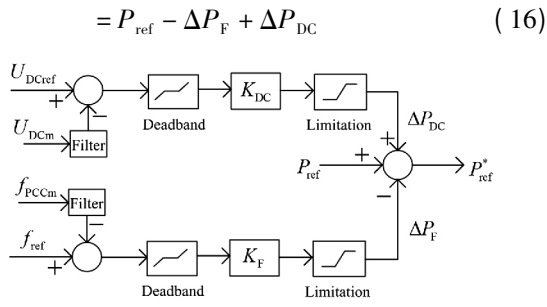


图 6 基于电压下垂的固定频率控制结构

#### 4.2.2 频率偏差 PI 控制

基于 PI 的频率偏差控制结构如图 7 所示, 频率的参考值计算方法为: 采集所有参与频率协调控制换流站交流侧的频率  $f_{PCCi}$ , 然后进行求和, 最后利用  $n$  个频率信号的平均值作为频率的参考值  $\bar{f}$ 。

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{PCCi} \quad (17)$$

每个换流站频率调制引入附加功率为

$$\Delta P_F = K_p + \frac{K_I}{s} (f_{PCCi} - \bar{f}) = (K_p + \frac{K_I}{s}) \Delta f \quad (18)$$

当网络出现不平衡功率时, 由于控制器中的积分调节作用, 使得最终稳态时异步网络的频率都趋向于平均频率  $\bar{f}$ , 这样就可以在很大程度上减少交流系统负荷变化导致的频率偏差过大。在这种情况下, MMC - MTDC 系统起到了交流联络线的作用, 不同交流系统之间实现了备用容量的相互支撑, 提高了电网的频率稳定性。

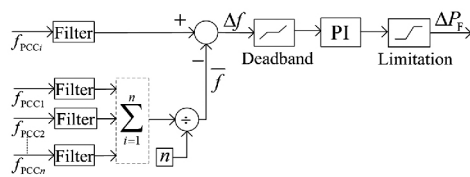


图 7 频率偏差 PI 控制结构

#### 4.2.3 功率估算频率控制

交流系统中负荷的变化量通常很难估计, 为此提出根据频率的变化量利用功频特性系数进行交流侧功率变化量的估计, 然后根据功率变化量来调整 MMC 换流站的附加功率。根据 MMC 换流站在频率协调控制中扮演的角色, 叠加频率相关的功率分量至其外环控制器。非频率事故的交流系统通过 MMC - MTDC 实现频率支撑时的附加功率与该交流系统的功 - 频特性系数正相关, 故可利用功 - 频静特性系数之比来决定换流站的功率支撑比例。其实

现过程如图 8 所示, 其中:  $K_i$  表示频率故障端的功 - 频特性系数;  $\alpha$  ( $\alpha \in [0, 1]$ ) 表示需要调制的功率的范围; 非频率故障的模块中的  $\beta_n$  表示第  $n$  个换流站所占支撑功率的比例。其满足如下表达式:

$$\beta_1 : \beta_2 : \dots : \beta_n = K_1 : K_2 : \dots : K_n \quad (19)$$

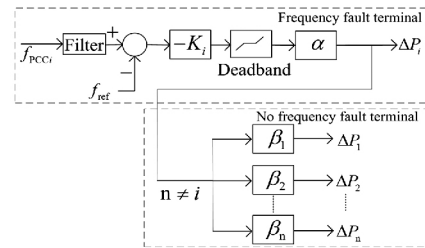


图 8 功率估算频率控制结构

## 5 仿真分析

为了验证所提出的频率协调控制策略在基于 MMC - MTDC 的交直流系统中的控制效果, 将所提的各种控制方法运用于仿真算例中进行研究。在图 1 的区域 1 中加入 450 MW 的负荷, 由于负荷的增加将导致区域 1 的频率下降, 为了减小区域 1 的频率变化量, 通过 MMC - MTDC 来实现区域间的功率支撑和频率协调。系统仿真参数如表 1 至表 4 所示。

表 1 交流系统功 - 频静特性系数

交流系统	功 - 频静特性系数 / (MW · Hz <sup>-1</sup> )
$K_1$	1 548.7
$K_2$	400
$K_3$	273.6
$K_4$	931.7

#### 算例 1: 直流电压下垂控制

为了验证频率协调控制策略的有效性, 以电压下垂控制在频率故障中的响应特性为参照,  $t = 2$  s 时, 在区域 1 中交流母线 3 处加入 450 MW 的负荷。从表 1 中的  $K_1$  可以获得频率的理论变化量为 -0.29 Hz。通过图 9 的仿真结果可以看出, 区域 1 的频率下降至 49.71 Hz 左右, 其他交流区域频率无变化。传输的有功功率和直流电压均无变化, 说明直流电压下垂控制策略无法实现交流系统间频率变化时的功率支撑和频率协调, 无法利用具有备用容量系统的功率支撑, 这给系统的稳定运行带来了风险。

表2 换流站系统参数

系统参数	MMC1	MMC2	MMC3	MMC4
额定容量 /MW	1200	400	400	800
变比/kV	345/260	345/260	345/260	345/260
变压损耗 / (p. u.)	0.18	0.18	0.18	0.18
电平数	201	201	201	201
$C_{SM}$ /mF	15	5	5	10
桥臂电抗 /mH	19	58	58	29
运行模式	逆变	整流	整流	整流
控制方式	PV/Q	PV/Q	PV/Q	PV/Q
直流电压 /kV	500	500	500	500
无功功率 /MVA	-150	20	0	0

表3 发电机参数

母线	额定容量 /MVA	惯性常数	$x'_d$ / (p. u.)	$x'_q$ / (p. u.)
30	609.6	5.8	0.031	0.031
31	647.7	3.142	0.064 7	0.069 7
32	749.8	3.564	0.053 1	0.053 1
33	700	3.6	0.043 6	0.043 6
34	612.6	3.41	0.132	0.132
35	797.8	5.016	0.05	0.05
36	659.9	3.141	0.049	0.049
37	749.8	3.141	0.057	0.057
38	1143	5.32	0.057	0.057
39	1 493.8	5.02	0.006	0.006

母线	$x_d$ / (p. u.)	$x_q$ / (p. u.)	$T'_{d0}$ /s	$T'_{q0}$ /s
30	0	0.069	10.2	0
31	0.295	0.282	6.56	1.5
32	0.249 5	0.237	5.7	1.5
33	0.262	0.258	5.69	1.5
34	0.67	0.62	5.4	0.44
35	0.254	0.241	7.3	0.4
36	0.295	0.292	5.66	1.5
37	0.29	0.28	6.7	0.41
38	0.210 6	0.205	4.79	1.9
39	0.2	0.019	7	0.7

表4 直流线路参数

线路区间	MMC1 – MMC2	MMC1 – MMC3	MMC2 – MMC4	MMC3 – MMC4
线路长度	200 km	100 km	200 km	200 km
线路参数	$R = 3.576 \times 10^{-5} \Omega/m$ $X_L = 5.078 \times 10^{-4} \Omega/m$ $X_C = 6.16 M\Omega \cdot m$			

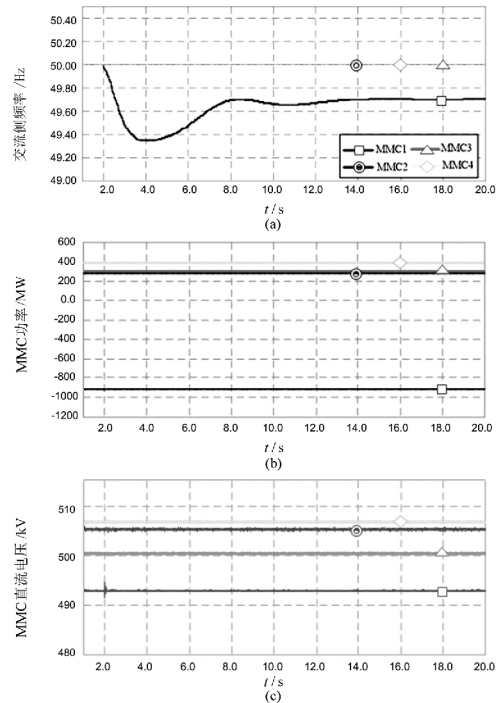


图9 直流电压下垂控制策略

算例2: 固定频率控制

如图10所示,在  $t = 2$  s 之前,交流系统的频率以额定频率运行。在 2 s 时负荷的增加使得区域1的频率下降,由于 MMC – MTDC 采用的是频率协调控制策略,区域1的频率下降使得 MMC1 换流站的功率参考值增加,直流电压下垂控制策略使得其余换流站进行功率支撑,从而导致参与功率支撑的交流系统的频率下降。区域1的频率在稳定运行后频率维持在 49.80 Hz 左右,MMC1 的传输功率提升了 150 MW 左右,由于 MMC2、MMC3、MMC4 传输的功率都分别增加了 33 MW、41 MW、91 MW,使得各交流系统频率相应下调,换流器损耗和线路损耗产生了 15 MW 的功率缺额。直流电压下垂系数  $K_{DC} = 3$ ,导致直流电压的下降幅度较大。仿真结果表明,该控制策略能够有效地通过 MMC – MTDC 系统实现区域间的功率支撑和频率协调。

算例3: 频率偏差 PI 控制

由于基于 PI 调节的频率偏差控制采用的是比

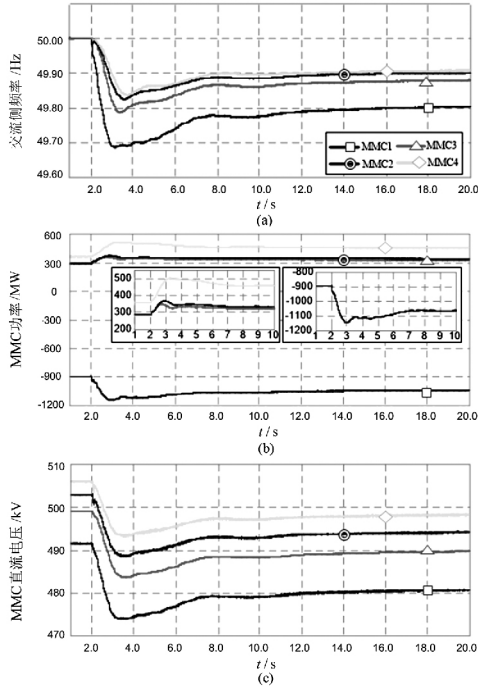


图 10 固定频率控制策略

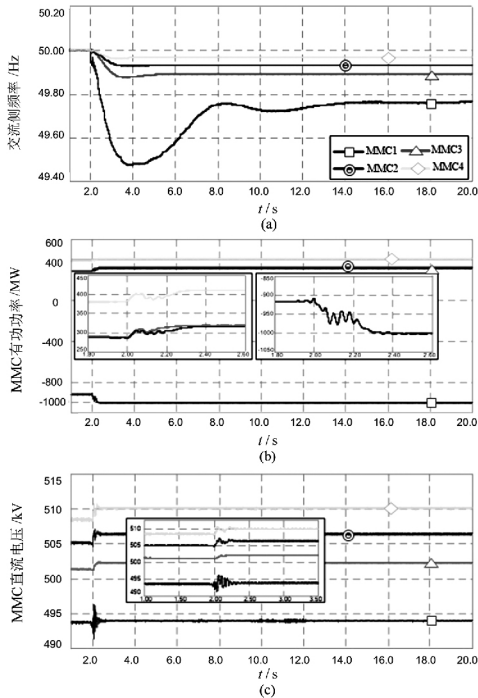


图 11 频率偏差 PI 控制

例积分控制器,使得每个交流系统的频率不断在调整追踪 $\bar{f}$ ,如图 11 所示。系统达到新的稳态时,区域 1 的频率为 49.77 Hz 左右,与直流电压下垂控制相比,其稳态频率提升了 0.06 Hz 左右,MMC1 传输的功率提升了 90 MW,同时由于 MMC2、MMC3 和 MMC4 都参与了频率协调控制,故其增加的输出功

率会引起交流系统的频率下降。频率偏差 PI 控制的控制结构不同于算例 2 中的控制结构,在协调控制器响应后直流电压有所上升,但是变化幅度较小。仿真结果表明,采用该控制策略可以有效地实现区域间功率的支撑和频率协调,并且不会引入过大的直流电压偏差,这对直流电压稳定要求较高的系统具有优越性。

#### 算例 4: 功率估算频率控制

基于功率估算的频率协调控制策略对应的仿真结果见图 12、图 13 和图 14,分别对应于  $\alpha = 1/3$ 、 $\alpha = 2/3$ 、 $\alpha = 1$ 。该策略通过实时采集区域 1 的频率变化,根据频率的变化量利用功-频静特性系数来估算交流系统的功率变化量,将该功率量叠加至 MMC1 的外环控制器,并将该分量按照  $K_2:K_3:K_4 = 0.25:0.17:0.58$  的比例分别叠加至 MMC2、MMC3、MMC4 的外环控制器中。通过调整  $\alpha$  的值实现非事故区域对区域 1 的频率支撑和频率协调。仿真结果表明通过控制  $\alpha$  的大小可以不同程度地实现异步电网频率协调控制策略,更好地利用交流系统的旋转备用容量。采用频率协调控制的换流站根据功频静特性系数大小决定附加功率,该方法可以有效地防止功频静特性系数较小的交流系统实现功率支撑时引起较大的频率偏移,故该方法在异步联网系统中具有较好的适用性。

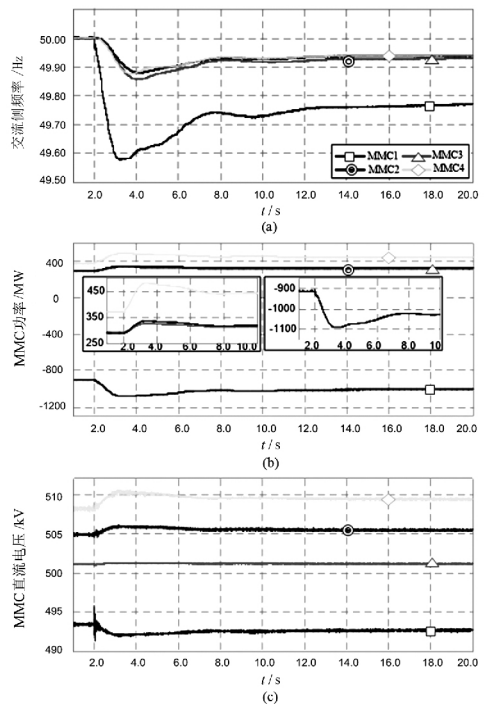


图 12  $\alpha = 1/3$  时功率估算频率控制

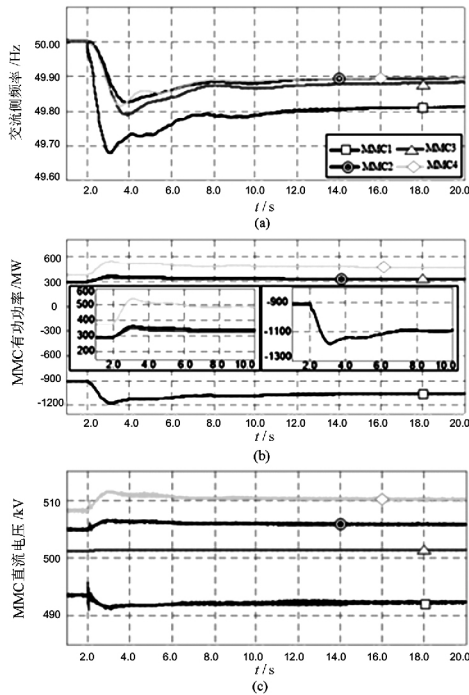


图 13  $\alpha = 2/3$  时功率估算频率控制

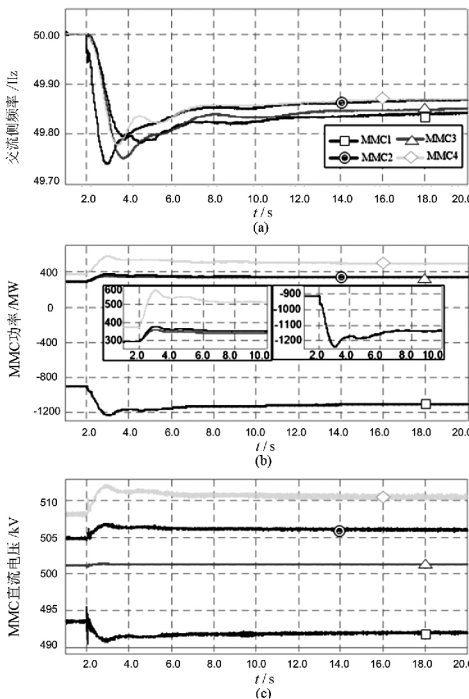


图 14  $\alpha = 1$  时功率估算频率控制

## 6 结 语

前面提出了 3 种基于 MMC - MTDC 输电系统的频率协调控制策略的方法。该控制策略在 MMC 异步联网时实现不同区域的功率支撑和频率协调, 根据频率变化自动调整 MMC 的传输功率。固定频

率控制中控制器输入的参考值为额定值, 在交直流区域同步中具有优势, 在异步联网中适用于功频特性系数较大的交流系统。频率偏差 PI 控制方法中由于频率的参考值进行了全局处理, 可以较好地实现异步交流系统频率的实时跟踪控制, 在实现区域功率支撑时, 频率稳定特性良好。功率估算频率控制的方法具有更好的适用性, 在实际系统中负荷变化一般是不明确的, 测量的频率变化可以反映出功率缺额, 为此利用交流系统的频率支撑能力来设置换流站的功率支撑量, 换流站可以更为合理地分配网络不平衡功率。

## 参 考 文 献

- [1] Vrana T K, Dennetiere S, Yang Y, et al. The CIGRE B4 DC Grid Test System[J]. Electra, 2013, 270: 10 - 19.
- [2] An T, Zhou X, Han C, et al. A DC Grid Benchmark Model for Studies of Interconnection of Power Systems [J]. Csee Journal of Power & Energy Systems, 2016, 1(4): 101 - 109.
- [3] Renedo J, Garcia - Cerrada A, Rouco L. Reactive - power Coordination in VSC - HVDC Multi - terminal Systems for Transient Stability Improvement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3758 - 3767.
- [4] Leon A E. Short - term Frequency Regulation and Inertia Emulation Using an MMC - based MTDC System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2854 - 2863.
- [5] Eriksson R. Coordinated Control of Multi - terminal DC Grid Power Injections for Improved Rotor - angle Stability Based on Lyapunov Theory [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1789 - 1797.
- [6] Xu L, Williams B W, Yao L. Multi - terminal DC Transmission Systems for Connecting Large Offshore Wind Farms [C]// 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008: 1 - 7.
- [7] Hendriks R L, Delft T U, Paap G C, et al. Control of A Multi - terminal VSC Transmission Scheme for Connecting Offshore Wind Farms [C]// European Wind Energy Conference, Milan, Italy, 2007.
- [8] Li X, Guo L, Hong C, et al. Hierarchical Control of Multi - terminal DC Grids for Large - scale Renewable Energy Integration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1448 - 1457.

(下转第 67 页)



CCM模式和DCM模式时ESR的临界值,最后通过PSIM仿真验证。研究表明,峰值电流控制的ESR临界值最小, $V^2$ 控制的ESR临界值最大, $V^2C$ 控制的ESR临界值介于两者之间; $V^2C$ 控制内环在 $V^2$ 控制中引入电感电流反馈,增大了稳定工作范围。所得的结论可以为分布式发电系统中DC-DC变换器设计和器件选型提供重要的指导意义。

参考文献

[1] Abusorrah A, Al-Hindawi M M, Al-Turki Y, et al. Stability of A Boost Converter Fed From Photovoltaic source [J]. Solar Energy, 2013, 98(4): 458-471.

[2] 刘俊杰,张新燕. 基于PSIM的光伏模块建模与电气特性仿真[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 06-08.

[3] 曹龙汉,余佳玲,李景南,等. 基于MATLAB/Simulink的光伏电池仿真建模研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 718-721.

[9] 朱瑞可,王渝红,李兴源,等. 用于VSC-HVDC互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 81-87.

[10] Elansari A S, Finney S J, Burr J, et al. Frequency Control Capability of VSC-HVDC Transmission System [C]// IET International Conference on AC and DC Power Transmission 2015: 1-6.

[11] Rink Y, Held L, Wenig S, et al. On Implementation of Primary Frequency Control in MMC-HVDC Transmission Systems [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2017: 1-6.

[12] Ajaei F B, Irvani R. Dynamic Interactions of the MMC-HVDC Grid and Its Host AC System due to AC-Side Disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1289-1298.

[13] Li H, Liu C, Li G, et al. An Enhanced DC Voltage Droop-control for the VSC-HVDC Grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1520-1527.

[14] Athay T, Podmore R, Virmani S. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1979, PAS-98(2): 573-584.

[15] <http://b4.cigre.org/Publications/Technical-Brochures/TB-604-2014-Guide-for-the-Development-of-Models-for-HVDC-Converters-in-a-HVDC-Grid>.

[16] Haileselassie T M, Uhlen K. Frequency Sensitivity A-

[4] 周国华,许建平. 开关变换器调制与控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 815-831.

[5] Wang J, Bao B, Xu J, et al. Dynamical Effects of Equivalent Series Resistance of Output Capacitor in Constant On-time Controlled Buck Converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1759-1768.

[6] Redl R, Sun J. Ripple-based Control of Switching Regulators—An Overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2669-2680.

[7] Zhou G, He S, Zhang X, et al. Critical Output-capacitor ESR for Stability of  $V^2$ , Controlled Buck Converter in CCM and DCM [J]. Electronics Letters, 2014, 50(12): 884-886.

作者简介:

游志昆(1992),工学硕士,研究方向为电力电子技术与电路理论等方面。(收稿日期:2018-08-28)

(上接第13页)

analysis of AC Grids Connected to MTDC Grid [C]// IET International Conference on AC and DC Power Transmission 2010: 1-5.

[17] Haileselassie T M, Uhlen K. Primary Frequency Control of Remote Grids Connected by Multi-terminal HVDC [C]// Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010: 1-6.

[18] Kolb J, Kammerer F, Braun M. Straight Forward Vector Control of the Modular Multilevel Converter for Feeding Three-phase Machines over Their Complete Frequency Range [C]// IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011: 1596-1601.

[19] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[20] 刘天琪,邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

作者简介:

杨林(1991),硕士,主要从事电力系统稳定与控制、直流输电技术、设备检修等方面的研究和工作;

邓鸿强(1986),硕士,主要从事电力系统运行、稳定与控制、设备检修的等方面的研究和工作;

邓云仁(1986),硕士,主要从事电力系统运行、稳定与控制、继电保护和自动化等方面的研究和工作;

黄晶(1994),硕士,主要从事电力系统稳定与控制、新能源开发与利用、设备检修等方面的研究和工作;

陈浩(1994),硕士,主要从事电力系统稳定与控制、柔性直流输电方面的研究。(收稿日期:2018-09-12)