

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.010

# 计及主站容量裕度的柔性直流互联系统主从控制策略

王楚扬, 张秋玥, 张犁

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 柔性直流互联技术可有效改善电网电能质量、增强供电可靠性、提升新能源消纳水平。采用主从控制的柔性直流互联系统中, 负荷突增和新能源出力短时波动等突发工况易导致主站实际功率超过其容量。传统功率限值或调度方法难以及时平抑功率波动, 进而导致直流侧电压异常, 威胁系统正常运行。为此, 文中提出一种计及主站容量裕度的主从控制策略。该策略优化了主站的运行机制, 将容量裕度因素纳入主站运行模式中, 调整了主站电压环的环路结构与变量定义, 并增加了基于过容功率的闭环抑制环路, 保障了主站对直流母线电压的持续调节能力。由于主站在平衡系统功率时需要从站间的协调运行, 因此文中在从站传统运行模式及原有调度基础上引入了从站间的功率支援机制, 在系统功率平衡等约束条件下建立了系统经济损失最小、源储设备损耗最小的多目标优化模型, 并利用非支配排序遗传算法-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II) 对优化模型进行快速求解。最后通过仿真验证了所提策略能有效防止主站过容, 保障柔性直流互联系统稳定、高效运行。

**关键词:** 柔性直流互联系统; 主从控制; 容量裕度; 从站协同控制; 功率支援; 有功优化潮流

**中图分类号:** TM711

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)03-0081-11

## 0 引言

随着电力电子器件与控制技术的快速发展, 以电压源换流器为基础的柔性直流技术在输电网层面得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。柔性直流互联技术可以有效改善区域内配电网的电能质量、增强供电可靠性, 同时提升高比例新能源消纳水平, 提高新能源并网稳定性, 因此具有非常广阔的发展前景<sup>[6-11]</sup>。

对柔性直流互联系统的直流侧电压进行稳定控制是保持系统功率平衡的前提条件<sup>[12-14]</sup>。直流侧电压的控制方式包括主从控制、电压裕度控制和下垂控制, 其中主从控制的控制环路简单, 可靠性高, 因此文中研究主要基于主从控制。随着新能源设备的大量接入和负荷端功率需求的不断增加, 调度周期内主站的容量逐渐难以满足系统功率平衡和紧急情况下功率支援的需求<sup>[15-16]</sup>。而输出功率超过主站容量会造成柔性直流互联系统功率不平衡, 进而导致直流电压异常波动<sup>[17]</sup>, 甚至会使主站发生故障而离网。因此, 如何在主站容量范围内保证柔性直流互联系统功率平衡的问题亟待解决<sup>[18-20]</sup>。

针对主站功率超过其容量的问题, 传统方法是对主站进行功率约束, 当功率超过其容量时将主站转为定功率模式的从站, 将有容量裕度的从站变为主站<sup>[21]</sup>。但这种方法存在切换延时, 无法及时平抑系统波动, 而且会导致功率波动下主从站间的反复

切换, 影响系统稳定。此外, 针对柔性直流互联系统功率不平衡问题, 目前已有部分文献给出了解决方案<sup>[22-28]</sup>。第一类解决方案是通过检测电压或功率偏差, 使用自适应下垂控制分配不平衡的功率: 文献[22]根据交流侧频率变化生成自适应下垂控制系数, 分配系统各换流站的功率, 使功率分配更加合理, 提升系统面对扰动时的惯性水平; 文献[23]结合直流电压、传输功率极限值和安全运行裕度边界, 根据直流侧电压偏差和功率偏差修正下垂系数, 优化换流站的功率分配, 提高系统应对扰动的响应速度和稳定性; 文献[24]通过检测直流电压偏差和功率裕度调整下垂系数、分配换流站功率, 减少传输功率变化造成的直流电压偏差, 优化系统运行特性。另一类解决方案是对系统进行分层协调控制: 文献[25]提出一种基于不同时间尺度的分层控制策略, 根据直流母线电压将系统划分为多个运行区间和工作模态, 并通过切换系统中各单元控制策略实现系统在不同工况下的稳定运行、协调控制和能量管理; 文献[26]引入二次功率协调控制, 根据各换流站容量和运维人员的设定合理分配功率; 文献[27]针对功率不平衡引起的直流过电压问题, 提出通过控制风场侧换流站频率或电压, 降低风电场输出功率, 从而减小系统的输入功率, 实现系统功率的平衡; 文献[28]提出配置能量耗散装置, 吸收系统冗余功率, 保证系统功率平衡。这些方法能够部分解决因扰动造成的系统功率波动问题, 但未考虑换流站容量限制。

因此, 文中基于传统主从控制与功率支援, 考

收稿日期: 2022-10-29; 修回日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007052)

虑换流站容量裕度约束,提出一种计及主站容量裕度的主从控制策略。该策略优化了主站的运行机制,将容量裕度因素纳入主站的运行模式中,调整了主站电压环的环路结构与变量定义,并增加了基于过容功率的闭合抑制环路。由于主站在平衡系统功率时需要从站间的协调运行,因此在从站传统运行模式及原有调度方法的基础上引入从站间的功率支援机制,在系统功率平衡等约束条件下建立系统经济损失最小、源储损耗最小的多目标优化模型,并利用非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)对优化模型进行快速求解。最后通过仿真验证了所提策略能有效防止主站过容,保障柔性直流互联系统稳定、高效运行。

## 1 柔性直流互联系统中换流站的基本拓扑和控制策略及运行模式

### 1.1 单个换流站拓扑

模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)可以被拆分为3个独立的、结构相同的单相半桥结构,如图1所示。

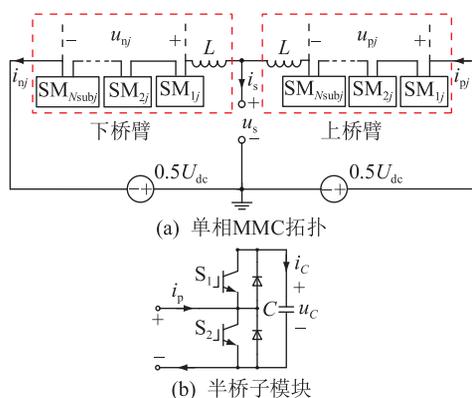


图1 三相 MMC 中的单相半桥结构

Fig.1 Single-phase half-bridge structure in three-phase MMC

图1中,  $u_{pj}$ 、 $u_{nj}$ 分别为上、下桥臂电压,  $j$ 为半桥结构的相序,取0(a相)、1(b相)、2(c相);  $i_{pj}$ 、 $i_{nj}$ 分别为上、下桥臂电流;  $u_s$ 为交流电压;  $i_s$ 为交流电流;  $U_{dc}$ 为直流侧电压;  $L$ 为桥臂电感;  $N_{sub}$ 为每个桥臂的子模块数量。子模块最简单的结构为半桥拓扑,其中  $C$ 为子模块电容;  $u_c$ 、 $i_c$ 分别为子模块电容的电压、电流幅值;  $S_1$ 、 $S_2$ 分别为半桥上、下桥臂开关。由于文中仿真的柔性直流互联系统采用的MMC换流站模型包含的子模块数量较少,为保证输出电能质量,仿真采用载波移相脉宽调制(pulse width modulation, PWM)策略:每个桥臂配置的载波个数为

$N_{sub}$ ;三相调制波各差  $120^\circ$ ;交流电压、电流的基波频率为  $f_0$ ;角频率为  $\omega_0$ ;开关频率为  $f_s$ ;开关周期为  $T_s$ 。此外,上、下桥臂的调制波分别定义为  $u_{pj\_ref}$ 、 $u_{nj\_ref}$ ,在开环下表达式近似为:

$$\begin{cases} u_{pj\_ref} = \frac{U_{dc}}{2} \left( 1 + M \cos \left( 2\pi f_0 t - \frac{2\pi}{3} j \right) \right) \\ u_{nj\_ref} = \frac{U_{dc}}{2} \left( 1 - M \cos \left( 2\pi f_0 t - \frac{2\pi}{3} j \right) \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M$ 为调制比。MMC每一相的主电路状态方程可以表示为:

$$\begin{cases} L \frac{d(i_{pj} - i_{nj})}{dt} = L \frac{di_{sj}}{dt} = -2u_{sj} - (u_{pj} - u_{nj}) \\ L \frac{d(i_{pj} + i_{nj})}{dt} = 2L \frac{di_{zj}}{dt} = U_{dc} - (u_{pj} + u_{nj}) \\ u_{pj} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{differ\_j} + u_{com\_j} \\ u_{nj} = \frac{U_{dc}}{2} + u_{differ\_j} + u_{com\_j} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_{zj}$ 为虚拟环流;  $u_{differ\_j}$ 、 $u_{com\_j}$ 分别为上、下桥臂电压的差模电压和共模电压<sup>[29]</sup>,分别与交流电流和环流相关。

### 1.2 单个换流站控制策略

三相坐标系下各个电气量均为时变交流量,不利于直观得到有功分量或无功分量。因此须转为两相坐标系,其变换矩阵为:

$$C_{3/2} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) & \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega_0 t) & -\sin\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(2)进行坐标变换,并进一步简化得:

$$\begin{cases} \frac{L}{2} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1sd} \\ u_{2sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_0 Li_{sq}/2 + u_{differ\_d} - u_{sd} \\ -\omega_0 Li_{sd}/2 + u_{differ\_q} - u_{sq} \end{bmatrix} \\ L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{zd} \\ i_{zq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1zd} \\ u_{2zq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\omega_0 Li_{zq} + u_{com\_d} \\ -2\omega_0 Li_{zd} + u_{com\_q} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_{sd}$ ( $i_{sq}$ )、 $i_{zd}$ ( $i_{zq}$ )、 $u_{differ\_d}$ ( $u_{differ\_q}$ )、 $u_{com\_d}$ ( $u_{com\_q}$ )、 $u_{zd}$ ( $u_{zq}$ )、 $u_{sd}$ ( $u_{sq}$ )分别为交流电流、环流、桥臂差模电压、桥臂共模电压、直流电压、交流电压的  $d(q)$ 轴分量。  $u_{1sd}$ 、 $u_{2sq}$ 、 $u_{1zd}$ 、 $u_{2zq}$ 作为调节器的输出和主电路的输入信号。此时,可以得到单个换流站基于  $dq$ 变换的控制策略,如图2所示。其中  $i_{sd\_ref}$ ( $i_{sq\_ref}$ )、 $i_{zd\_ref}$ ( $i_{zq\_ref}$ )分别为  $d(q)$ 轴的交流电流、环流参考

值;  $U_{pa\_ref}$ 、 $U_{pb\_ref}$ 、 $U_{pc\_ref}$  为三相电压参考值; PI 为比例积分控制。

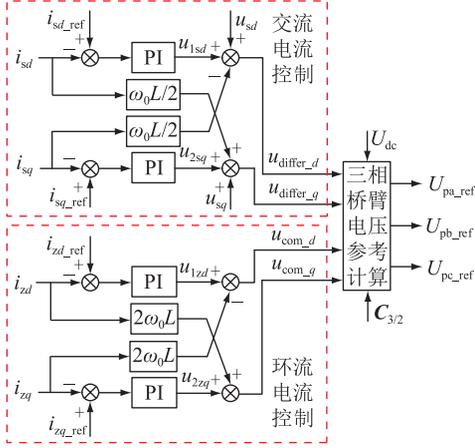


图2 换流站基于dq变换的控制策略

Fig.2 Control strategy of converter station based on dq transformation

### 1.3 换流站基本运行模式

基于柔性直流互联系统的换流站运行模式可分为  $P$ - $Q$ 、 $U_{dc}$ - $Q$ 、 $P$ - $V$  和下垂4种。文中仅考虑  $P$ - $Q$  和  $U_{dc}$ - $Q$  运行模式。

#### 1.3.1 换流站的 $P$ - $Q$ 运行模式

$P$ - $Q$  模式是 MMC 换流站最基本的运行模式,该模式下有功功率参考值  $P_{ref}$  和无功功率参考值  $Q_{ref}$  由换流站的控制系统给定,与交流侧电流滞后电网电压的相位  $\varphi$  间的关系为:

$$\varphi = \tanh(Q_{ref}/P_{ref}) \quad (5)$$

此时,交流电流及环流在  $d$  轴与  $q$  轴上的基准分别为:

$$\begin{cases} i_{sd\_ref} = \frac{2P_{ref}}{3u_{sd} \cos(\tanh(Q_{ref}/P_{ref}))} \\ i_{zd\_ref} = 0 \\ i_{sq\_ref} = \frac{2Q_{ref}}{3u_{sq} \sin(\tanh(Q_{ref}/P_{ref}))} \\ i_{zq\_ref} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,环流的交流分量一般限制到0,因此其  $dq$  轴分量也均为0,并与换流站的有功、无功功率无关。文中定义  $P>0$  表示从系统输出功率,功率从直流母线经换流站馈出交流馈线;  $P<0$  表示向系统输入功率,功率从交流馈线经换流站馈入直流母线。

#### 1.3.2 换流站的 $U_{dc}$ - $Q$ 运行模式

$U_{dc}$ - $Q$  模式中,换流站控制直流侧电压,其参考值为  $U_{dc\_ref}$ 。采用双环控制,内环为电流环,外环为直流电压环。2种运行模式如图3所示。其中  $P$ - $Q$  模式下无电压外环,有功功率基准直接给定;  $U_{dc}$ - $Q$  模式下,有功功率基准由电压外环生成。

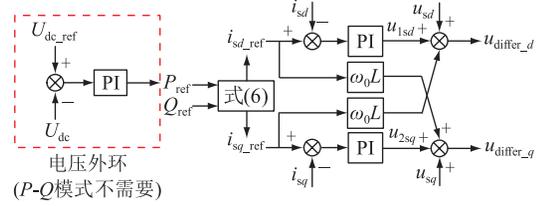


图3 换流站的  $P$ - $Q$  和  $U_{dc}$ - $Q$  运行模式

Fig.3 Operating mode of converter station based on  $P$ - $Q$  and  $U_{dc}$ - $Q$

## 2 考虑容量裕度的主站运行模式

### 2.1 系统约束条件及主站基本控制策略

柔性直流互联系统中,各换流站间的通信可以依托已有的光纤复合架空地线光缆实现,通信延时一般不超过5ms,能满足主从控制快速响应的要求。主从控制通常选择1个主站运行于  $U_{dc}$ - $Q$  模式,其余换流站作为从站运行于  $P$ - $Q$  模式,采用主从控制的系统架构如图4所示。

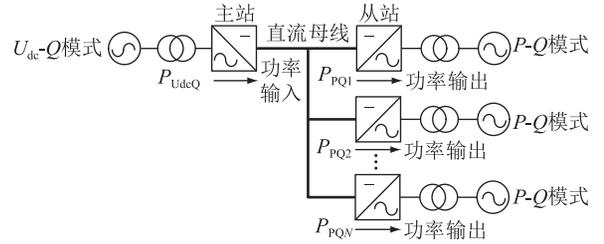


图4 柔性直流互联系统的基本架构

Fig.4 Basic architecture of flexible DC interconnection system

为简化分析,忽略换流站和线路损耗,则根据图4及主站输入功率  $P_{UdcQ}$  和从站馈出功率  $P_{PQi}$  的功率守恒关系,柔性直流互联系统有功功率约束为:

$$P_{UdcQ} + \sum_{i=1}^N P_{PQi} = 0 \quad (7)$$

此外,主换流站须满足容量约束:

$$\sqrt{P_{UdcQ}^2 + Q_{UdcQ}^2} \leq S_{UdcQ}^2 \quad (8)$$

式中:  $N$  为从站个数;  $Q_{UdcQ}$  为主站注入系统的无功功率;  $S_{UdcQ}$  为主站容量。由于无功功率数值相对于有功功率较小,且无功功率对直流母线电压的影响也相对较小,因此,为简化分析,文中考虑容量约束时以有功功率为主。在一般情况下,主站拥有最大的容量,并保证系统输入、输出功率平衡。为观测主站功率情况,式(7)可变形为:

$$P_{UdcQ} = - \sum_{i=1}^N P_{PQi} \quad (9)$$

显然,当  $P_{UdcQ}>0$  时,主站工作于逆变状态,对外输出功率,定义为输出功率  $P_{out}$ ; 当  $P_{UdcQ}<0$  时,主

站工作于整流状态,向系统输入功率,定义为输入功率  $P_{in}$ 。式(7)可根据主站整流和主站逆变2种工作模式分别转化为式(10)和式(11):

$$P_{out}^Z = \sum_{i=1}^{N_+} P_{PQi+} = -P_{UdcQ-} - \sum_{i=1}^{N_-} P_{PQi-} \quad (10)$$

$$P_{out}^N = \sum_{i=1}^{N_+} P_{PQi+} + P_{UdcQ+} = - \sum_{i=1}^{N_-} P_{PQi-} \quad (11)$$

式中:  $P_{out}^Z$ 、 $P_{out}^N$  分别为主站整流和逆变工况下的输出功率;  $P_{PQi-}$  为第  $i$ -台从站向系统输入的功率;  $P_{PQi+}$  为第  $i$ +台从站从系统输出的功率;  $N_-$ 、 $N_+$  分别为对系统输入和从系统输出功率的从站数量;  $P_{UdcQ-}$ 、 $P_{UdcQ+}$  分别为处于整流和逆变模式下的主站功率。此时,如果不考虑容量的限制,由电压外环的输出可直接得到主站需要向系统注入的功率,即主站的功率基准  $P_{UdcQ-ref}$ ,可表示为:

$$P_{UdcQ-ref} = (K_{pUdcQ} + K_{iUdcQ}/s)(U_{dc} - U_{dc-ref}) \quad (12)$$

式中:  $K_{pUdcQ}$ 、 $K_{iUdcQ}$  分别为PI控制器的比例系数和积分系数;  $s$  为拉普拉斯算子;  $U_{dc-ref}$  为直流电压参考值。当  $P_{UdcQ-ref} > 0$  时,主站以逆变状态从系统输出功率;  $P_{UdcQ-ref} < 0$  时,主站以整流状态向系统输入功率。但实际工程中  $S_{UdcQ}$  有限,不能满足全部功率需求。因此,功率的输出需求超过主站的容量时,未考虑主站容量限制的主从控制策略将造成系统功率失衡。

## 2.2 计及容量裕度的主站运行模式

考虑  $S_{UdcQ}$  后,电压外环的输出值由主站实际注入系统的功率基准  $P_{UdcQ-ref}$  变为系统对外部交流馈线总输出功率的基准值  $P_{out-ref}$ ,因此主站整流和逆变时电压外环表达式由式(10)和式(11)改写为:

$$P_{out-ref}^Z \approx \sum_{i=1}^{N_+} P_{PQi+} \quad (13)$$

$$P_{out-ref}^N \approx \sum_{i=1}^{N_+} P_{PQi+} + P_{UdcQ+} \quad (14)$$

式(13)和式(14)中,由于  $P_{out-ref}$  为系统输出功率的基准值,当主站处于整流模式时,从站输出的功率之和与系统输出功率基准近似;主站处于逆变模式时,从站和主站的输出总功率与系统输出功率基准近似。因此,基于电压外环的控制结构,可根据式(10)和式(13)、式(11)和式(14)重新定义分别处于整流和逆变模式下的主站功率基准  $P_{UdcQ-ref}$  和  $P_{UdcQ+ref}$ ,分别为式(15)和式(16)。

$$P_{UdcQ-ref} \approx -P_{out-ref} - \sum_{i=1}^{N_-} P_{PQi-} = -(K_{pUdcQ} + K_{iUdcQ}/s)(U_{dc} - U_{dc-ref}) - \sum_{i=1}^{N_-} P_{PQi-} \quad (15)$$

$$P_{UdcQ+ref} \approx P_{out-ref} - \sum_{i=1}^{N_+} P_{PQi+} = (K_{pUdcQ} + K_{iUdcQ}/s)(U_{dc} - U_{dc-ref}) - \sum_{i=1}^{N_+} P_{PQi+} \quad (16)$$

此外,为了保证主站始终有调节直流母线电压的能力,同时为了避免电压环路输出饱和导致主站退化为定功率模式,主站必须保留一部分容量裕度。因此主站实际功率  $P_{UdcQ}$  还必须满足约束条件式(17)。

$$\begin{cases} |P_{UdcQ+}| \leq \lambda_{Udc} S_{UdcQ} \\ |P_{UdcQ-}| \leq \lambda_{Udc} S_{UdcQ} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\lambda_{Udc}$  为主站的功率基准系数,文中取 95%,使主站留出 5% 的功率裕度来保证对直流母线电压的调节能力。因此,根据式(17)对主站容量裕度的要求,定义主站功率基准超过其容量裕度的部分为过容功率  $\Delta P_{UdcQ}$ ,其大小可表示为:

$$\Delta P_{UdcQ} = \text{sgn}(P_{UdcQ}) \varepsilon(|P_{UdcQ}| - \lambda_{Udc} S_{UdcQ}) \times (|P_{UdcQ}| - \lambda_{Udc} S_{UdcQ}) \quad (18)$$

式中:  $\text{sgn}$  为符号函数;  $\varepsilon$  为阶跃函数,判断主站功率是否超过容量裕度。若  $\Delta P_{UdcQ} = 0$ ,主站功率未超过其容量裕度;若  $\Delta P_{UdcQ} > 0$ ,主站功率超出其容量裕度且处于逆变状态;若  $\Delta P_{UdcQ} < 0$ ,主站功率超出容量裕度且处于整流状态。因此,为保证主站功率不超过其容量裕度,过容功率  $\Delta P_{UdcQ}$  应趋近于 0。文中提出一种基于过容功率闭环的主站控制策略,在主站控制系统中加入了基于过容功率闭环的控制环路,该环路使计算得到的过容功率  $\Delta P_{UdcQ}$  经过PI控制器调减至 0,以此保证主站的功率始终在其容量裕度范围内。计及容量裕度的主站运行模式如图 5 所示。

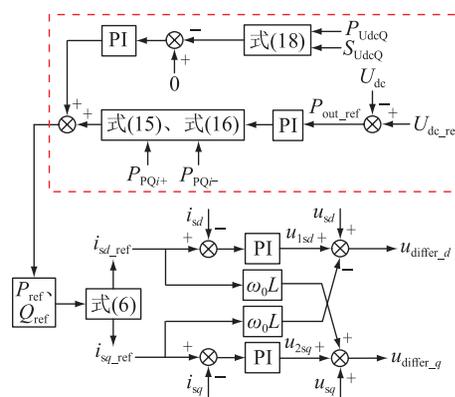


图 5 计及容量裕度的主站运行模式

Fig.5 Master operating mode with capacity margin

如图 5 所示,电压外环生成系统输出功率基准  $P_{out-ref}$ ,并通过计算得到主站功率基准。该基准通

过过容功率约束调减至主站的容量裕度内,最终得到的主站功率基准代入电流内环完成主从控制。运行模式中不能加入功率基准限额,否则会使主站退化为定功率模式运行,失去控制直流母线电压的能力。

### 3 考虑主站容量裕度的从站功率支援策略

#### 3.1 从站的运行模式及约束条件

第2章在计及主站容量裕度的基础上对主站运行模式进行调整。主站功率根据从站功率需求被动调节,当因突发工况导致个别从站在原有调度基础上产生了功率增量,调度机制无法即时调整,使得主站功率超过其容量裕度,产生过容功率  $\Delta P_{\text{UdcQ}}$  时,除了按第2章所提策略根据主站容量裕度约束调减其输出功率基准,还须从站协调其源储荷的功率进行功率支援。

从站按工作模式可以分为双向和单向从站2类:双向从站对接了大容量的源、储设备,除了从系统输出功率外,还能向系统输入功率以分担主站功率需求;单向从站不具有足量的源、储条件,从系统输出的功率远大于其输入功率。在调度周期内,由于功率波动导致从站源储荷产生的功率变化量与从站功率需求变化量可统一定义为:

$$\Delta P_{\text{PQ}_m} = \Delta P_{\text{Gen}_m} + \Delta P_{\text{Store}_m} + \Delta P_{\text{User}_m} \quad (19)$$

式中:  $\Delta P_{\text{PQ}_m}$  为第  $m$  个从站的功率需求变化量;  $\Delta P_{\text{Gen}_m}$  为第  $m$  个从站所连电源(一般为新能源设备)在原有调度指令上的输出变化量;  $\Delta P_{\text{Store}_m}$  为第  $m$  个从站所连储能设备在原有调度指令上的功率变化量;  $\Delta P_{\text{User}_m}$  为第  $m$  个从站所连交流馈线中负荷端在原有调度指令上的功率变化量。从站源、储设备功率变化量不能超过其容量,须满足以下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_{\text{Gen}_m} \leq \Delta P_{\text{Gen\_Max}_m} \\ |\Delta P_{\text{Store}_m}| \leq \Delta P_{\text{Store\_Max}_m} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\Delta P_{\text{Gen\_Max}_m}$ 、 $\Delta P_{\text{Store\_Max}_m}$  分别为第  $m$  个从站源、储设备在原有调度指令功率外还可以输出的最大功率增量。在确定了从站的运行模式后,其功率支援方法应根据主站的运行模式分为主站整流运行和逆变运行时2类功率支援策略。

#### 3.2 主站整流运行时从站的功率支援策略

主站整流运行时向直流母线输入功率。从站因负荷激增、新能源出力骤减等突发工况可能导致系统在原有调度基础上出现功率缺额  $\Delta P_{\text{PQ}_m}$ 。而调度策略时间尺度较长,难以及时消除突发工况造成的功率缺额,可能导致主站的功率需求超过其容量裕度。因此须快速调整从站源、储设备的功率指

令或者切除部分负荷,以配合主站进行功率支援,尽快消除因突发工况而导致的功率缺额,保证系统运行的稳定性。根据功率守恒,主站的过容功率与从站的源储荷设备的功率变化量须满足下述等式约束:

$$\Delta P_{\text{UdcQ}} = \sum_{m=1}^N (\Delta P_{\text{User}_m} + \Delta P_{\text{Gen}_m} + \Delta P_{\text{Store}_m}) \quad (21)$$

在满足功率约束,保证功率平衡、系统稳定的同时使系统经济效益最大化,故以突发工况下系统经济损失最小为优化目标。设置第  $m$  个从站所连电源单位输出功率均价为  $C_{\text{Gen}_m}(t)$ ; 储能设备的单位输出功率均价为  $C_{\text{Store}_m}(t)$ ; 负荷端每输入单位功率可获得的平均收益为  $C_{\text{User}_m}(t)$ ; 切除负荷造成的直接经济损失为  $C_{\text{Lost}_m}(t)$ , 以上价格随时间波动。为尽可能保证负荷端的用电安全,期望在源、储设备功率足够时不对负荷调减,以减少负荷切除对当地正常生产生活造成的影响。因此,将该期望引入目标函数,并定义安全指标系数  $\omega_m$ , 可得到成本最小的目标函数  $f_1(t)$ 。

$$\begin{aligned} \min f_1(t) = \min \sum_{m=1}^N \left[ \varepsilon \left( \Delta P_{\text{UdcQ}} - \sum_{m=1}^N \Delta P_{\text{Gen\_Max}_m} - \sum_{m=1}^N \Delta P_{\text{Store\_Max}_m} \right) \times \right. \\ \left. \omega_m |\Delta P_{\text{User}_m}| (C_{\text{User}_m}(t) + C_{\text{Lost}_m}(t)) + \right. \\ \left. |\Delta P_{\text{Gen}_m}| C_{\text{Gen}_m}(t) + |\Delta P_{\text{Store}_m}| C_{\text{Store}_m}(t) \right] \quad (22) \end{aligned}$$

根据式(22),源、储设备功率足够支撑突发工况的功率增量时,不调减负荷大小,因此不考虑负荷端成本。当且仅当源、储设备功率不足以满足功率增量需求时,为保证系统功率平衡,要对负荷进行相应调减,同时将负荷端成本纳入考虑。

其次,在系统的功率平衡和成本最小得到保证后,还应尽量减小源、储设备的使用损耗。期望源、储设备运行时的总功率最小,同时二者占各自从站容量比重的总和最小,以避免源、储设备满载运行。因此设立主站整流模式下源、储设备损耗占从站容量比重最小的目标函数  $f_2(t)$  和源、储设备损耗最小的目标函数  $f_3(t)$  为:

$$\begin{cases} \min f_2(t) = \min \sum_{m=1}^N \frac{|\Delta P_{\text{Gen}_m}| + |\Delta P_{\text{Store}_m}|}{S_{\text{PQ}_m}} \\ \min f_3(t) = \min \sum_{m=1}^N (|\Delta P_{\text{Gen}_m}| + |\Delta P_{\text{Store}_m}|) \end{cases} \quad (23)$$

式中： $S_{PQ_m}$  为第  $m$  个从站的容量。根据上文，从系统功率平衡、换流站功率不超过其容量裕度等角度，结合式(7)、式(8)、式(17)、式(20)和式(21)，整流运行时系统优化模型还须满足的约束条件为：

$$\begin{cases} |P_{UdcQ-}| \leq \lambda_{Udc} S_{UdcQ} \\ 0 \leq \Delta P_{Gen_m} \leq \Delta P_{Gen\_Max\_m} \quad m = 1, 2, \dots, N \\ |\Delta P_{Store_m}| \leq \Delta P_{Store\_Max\_m} \quad m = 1, 2, \dots, N \\ \Delta P_{UdcQ} = \sum_{m=1}^N (\Delta P_{User_m} + \Delta P_{Gen_m} + \Delta P_{Store_m}) \end{cases} \quad (24)$$

联立式(22)一式(24)即可得到柔性直流互联系统在主站整流运行时以功率平衡为基础，成本和源、储设备损耗最小的多目标数学模型。

### 3.3 主站逆变运行时从站的功率支援策略

主站逆变运行时从系统输出功率。当从站因突发工况造成负荷骤减、新能源出力激增时，系统在原有调度基础上出现冗余功率量  $\Delta P_{PQ_m}$ 。而调度策略时间尺度较长，难以及时消纳因突发工况产生的冗余功率，易导致输入主站的功率超过其容量裕度。此外，由于负荷端的功率需求由用户端决定，不能主动增加，因此冗余的功率量不能通过增加负荷来吸收，只能快速调整从站源、储设备的功率来配合主站进行功率支援，尽快消除因突发工况在原有调度基础上产生的冗余功率，保证系统的稳定性。根据功率守恒，主站的过容功率与从站的源、储设备的功率变化量须满足下述等式约束：

$$\Delta P_{UdcQ} = \sum_{m=1}^N (\Delta P_{Gen_m} + \Delta P_{Store_m}) \quad (25)$$

此模式下负荷端功率不用调减，故不用考虑负荷收益、损失及安全指标系数  $\omega_m$ 。这一工作模式下成本最小的目标函数  $f_1(t)$  可改为：

$$\min f_1(t) = \min \sum_{m=1}^N (|\Delta P_{Gen_m}| C_{Gen_m}(t) + |\Delta P_{Store_m}| C_{Store_m}(t)) \quad (26)$$

为尽快消纳系统的过容功率，必要时须调减从站源设备的发出功率。故取消考虑源功率调整的期望，则逆变模式下储能设备损耗占从站容量比重最小的目标函数  $f_2(t)$  和储能设备损耗最小的目标函数  $f_3(t)$  为：

$$\begin{cases} \min f_2(t) = \min \sum_{m=1}^N \frac{|\Delta P_{Store_m}|}{S_{PQ_m}} \\ \min f_3(t) = \min \sum_{m=1}^N |\Delta P_{Store_m}| \end{cases} \quad (27)$$

类似地，逆变运行时系统优化模型须满足的约束条件可表示为：

$$\begin{cases} |P_{UdcQ+}| \leq \lambda_{udc} S_{udcQ} \\ 0 \leq \Delta P_{Gen_m} \leq \Delta P_{Gen\_Max\_m} \quad m = 1, 2, \dots, N \\ |\Delta P_{Store_m}| \leq \Delta P_{Store\_Max\_m} \quad m = 1, 2, \dots, N \\ \Delta P_{UdcQ} = \sum_{m=1}^N (\Delta P_{Gen_m} + \Delta P_{Store_m}) \end{cases} \quad (28)$$

联立式(26)一式(28)即可得到柔性直流互联系统在主站逆变运行时以功率平衡为基础，成本和储能设备损耗最小的多目标数学模型。

### 3.4 计及主站容量裕度的从站功率支援策略

对于上述多目标模型，其优化核心是协调各目标函数之间的关系，找出使各目标函数都能逼近最小值的最优解集。为此文中采用能快速解决多目标问题的 NSGA-II 求解模型，具体参见文献[30]。使用 NSGA-II 分别对整流和逆变状态下的总目标函数进行计算求解，得到突发工况下各从站源储荷设备在原有调度基础上的最优变化功率指令。在主站功率不超过其容量裕度的前提下，实现从站最优功率支援。其中，第  $m$  个从站功率基准  $P_{PQ\_m\_ref}$  为：

$$P_{PQ\_m\_ref} \approx P_{User_m} + P_{Gen_m} + P_{Store_m} + \Delta P_{User_m} + \Delta P_{Gen_m} + \Delta P_{Store_m} \quad (29)$$

式中： $P_{User_m}$ 、 $P_{Gen_m}$ 、 $P_{Store_m}$  分别为第  $m$  个从站所连负荷端、电源、储能设备的功率调度指令。

明确了从站在主站整流和逆变 2 种状态下最优功率支援策略后，计及主站容量裕度的从站功率支援策略见图 6。其中， $P_{PQ\_ref\_initial}$  为初始功率参考值。

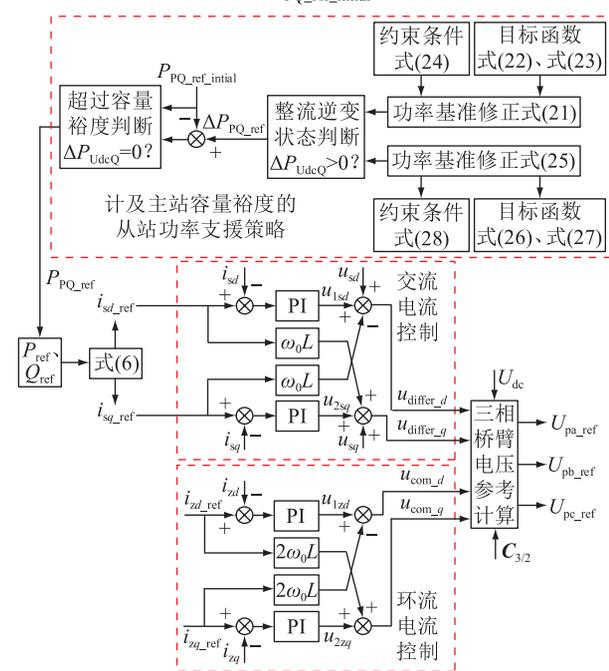


图 6 计及主站容量裕度的从站功率支援策略  
Fig.6 Slave power support strategy considering master capacity margin

图中,从站的功率基准由从站对接的电网功率需求和考虑主站容量裕度的从站功率支援共同决定。当主站过容功率  $\Delta P_{Udc-Q} = 0$  时,从站功率基准只包含电网功率需求部分; $\Delta P_{Udc-Q} \neq 0$  时,利用考虑主站容量裕度的从站功率支援对功率基准进行修正。

#### 4 仿真验证

为验证文中方法的可行性和有效性,以张北四端柔性直流互联(张北柔直)工程<sup>[31-32]</sup>为例,对文中方法和文献[21]所提传统主站限额方法进行仿真对比。根据张北柔直工程相关数据配置各换流站参数<sup>[32-33]</sup>,具体见表1。

表1 系统各换流站参数

Table 1 Parameters of each converter in the system

参数	数值
主站 A 最大输出功率/MW	3 000
整流时主站 A 平均发电成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.4
逆变时主站 A 平均供电收益/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.6
从站 B 负荷功率需求/MW	1 500
从站 B 平均负荷收益/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.7
从站 C 负荷功率需求/MW	750
从站 C 平均负荷收益/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.5
从站 C 新能源输出功率/MW	1 237.5
从站 C 新能源平均发电成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.3
从站 D 负荷功率需求/MW	975
从站 D 平均负荷收益/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.6
从站 D 储能最大输出功率/MW	750
从站 D 平均储能成本/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.9

仿真基于多功能系统级电气仿真软件 PLECS 搭建图7所示四端柔性直流互联系统仿真模型,并使用张北柔直工程数据对该系统进行仿真。

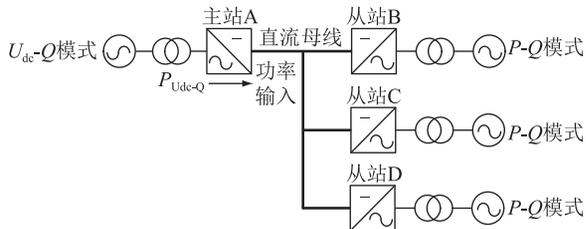


图7 多端柔性直流互联系统仿真模型

Fig.7 Multi-terminal flexible interconnection system simulation model

仿真模型包含主站A和从站B、C、D共4台换流站。其中,从站B只包含负荷,从站C包含新能源和负荷,从站D包含储能和负荷。文中以主站A处于整流和逆变2种运行模式进行仿真分析。此外,考虑到文中针对负荷突变、新能源出力波动等

突发工况进行优化,仿真还根据文献[33]所给出的张北柔直工程各换流站相关的越限情况,在算例中增加了对突发工况的模拟。

#### 4.1 算例1

算例1,主站A运行在整流模式,考虑其容量裕度,最大馈入功率为-2 850 MW( $\lambda_{udc} = 95\%$ )。初始情况下,从站B从直流母线馈出1 500 MW;3 min时用电量增加,B端负荷需求增大至3 000 MW;6 min时B端用电量进一步增大至3 375 MW。图8为文中方法和传统限额方法下各换流站功率和直流母线电压,表2为2种方法下各时段的收益。

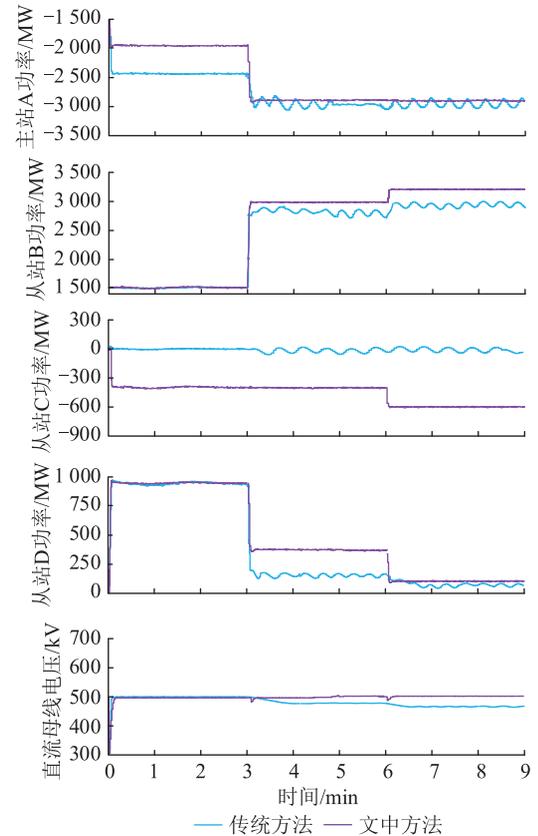


图8 整流状态下各换流站的有功功率及直流侧电压

Fig.8 Active power and DC side voltage of each converter station under rectification state

表2 整流状态下各时间段内不同方法的平均收益

Table 2 Average return of redundancy in each period under rectification state 元

时段	文中方法收益	传统方法收益	差值
0 min—3 min	42 187.50	39 750.00	2 437.50
3 min—6 min	48 750.00	40 400.95	8 349.05
6 min—9 min	49 237.50	40 797.40	8 440.10

0 min—3 min时段,根据文中优化模型的计算,系统功率由主站A和从站C的新能源共同提供,主站A出力下降,由传统方法需要的-2 475 MW降至-1 987.5 MW。

3 min—6 min 时段,从站 B 负荷功率需求增至 3 000 MW。传统方法下,主站 A 因过容而限额至其最大输出功率-3 000 MW;为了保证系统正常运行,从站 B 按比例切除负荷 169.81 MW,从母线馈出功率 2 830.19 MW;从站 C 的新能源向其负荷提供功率-750 MW;从站 D 按比例切除负荷 55.19 MW,从直流母线馈出功率 169.81 MW,其储能装置以最大功率-750 MW 输出。使用文中方法后,从站 C 的新能源和从站 D 的储能对系统进行功率支援,不用切除负荷。主站 A 向母线馈入最大功率-2 850 MW;从站 B 从母线馈出功率 3 000 MW;从站 C 新能源满额输出-1 237.5 MW,供给自身负荷后向母线馈入功率-487.5 MW 进行功率支援;从站 D 储能设施提供功率-637.5 MW,从母线馈出功率 337.5 MW。

6 min—9 min 时段,从站 B 负荷功率需求进一步增至 3 375 MW。传统方法下,主站 A 因过容而限额至其最大输出功率-3 000 MW;为了保证系统正常运行,从站 B 按比例切除负荷 465.52 MW,从母线馈出功率 2 909.48 MW;从站 C 的新能源向其负荷提供功率-750 MW;从站 D 按比例切除负荷 134.48 MW,从直流母线馈出功率 90.52 MW,其储能装置以最大功率-750 MW 输出。使用文中方法,在从站 C 的新能源和从站 D 的储能对系统进行功率支援后再切除少量负荷。主站 A 向母线馈入最大功率-2 850 MW;从站 B 按比例切除负荷 52.5 MW,从母线馈出功率 3 322.5 MW;从站 C 新能源满额输出-1 237.5 MW,切除负荷 112.5 MW,向母线馈入功率-600 MW 进行功率支援;从站 D 储能设施提供功率-750 MW,切除负荷 97.5 MW,从母线馈出功率 127.5 MW。

综上,采用文中方法后,换流站所连接的源、储设备能按照成本最小进行功率支援,在提升系统过负荷情况下稳定性的同时提高系统经济收益。

#### 4.2 算例 2

算例 2,主站 A 运行在逆变模式,从母线馈出功率,安全裕度下最大馈出功率( $\lambda_{udc} = 95\%$ )为 2 850 MW。初始情况下,从站 C 新能源向母线馈入-4 687.5 MW;3 min 时新能源出力增大至-6 750 MW;6 min 时新能源进一步增大至-7 500 MW。图 9 为使用文中方法和传统方法下各换流站功率和直流母线电压,表 3 为 2 种方法下各时段的收益。

0 min—3 min 时段,传统方法和文中方法类似,主站 A 从母线馈出功率 1 462.5 MW;从站 B 从母线馈出功率 1 500 MW;从站 C 向母线馈入功率-3 937.5 MW;从站 D 从母线馈出功率 975 MW。

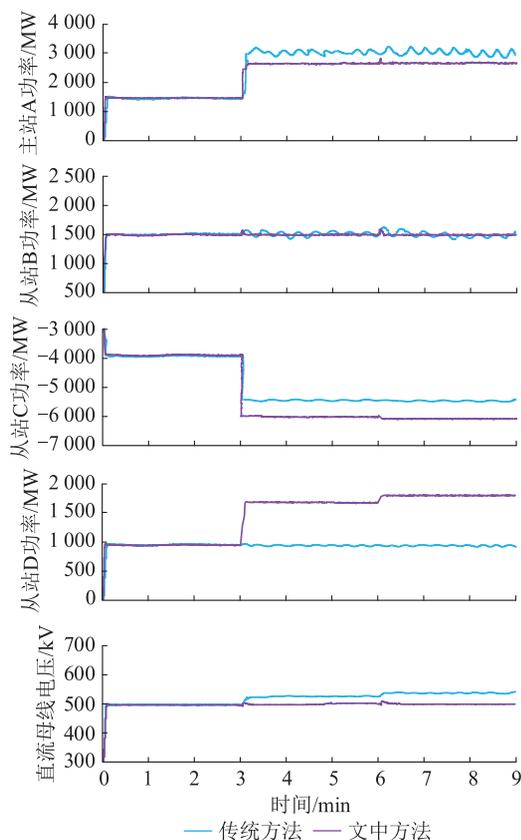


图 9 逆变状态下各换流站的有功功率及直流侧电压

Fig.9 Active power and DC side voltage of each converter station under inverter state

表 3 逆变状态下各时间段内不同方法的平均收益

Table 3 Average return of redundancy in each period under inverter state

时段	文中方法收益	传统方法收益	差值
0 min—3 min	74 062.5	74 062.5	0
3 min—6 min	115 125.0	97 125.0	18 000
6 min—9 min	117 375.0	97 125.0	20 250

3 min—6 min 时段,从站 C 新能源出力增至-6 750 MW。传统方法下,主站 A 因过容而限额至其最大输入功率 3 000 MW;从站 B 由母线馈出功率 1 500 MW;从站 D 储能元件不工作,从直流母线馈出功率 975 MW;为了保证系统正常运行,切除新能源出力-525 MW,从站 C 在供给自身负荷后向母线馈入功率-5 475 MW。使用文中方法,从站 D 的储能设施对系统进行功率支援,无需切除新能源。主站 A 从母线馈出最大功率 2 850 MW;从站 B 从母线馈出功率 1 500 MW;从站 D 储能设施充电吸收功率 675 MW,从母线馈出功率 1 650 MW;从站 C 新能源输出-6 750 MW,向母线馈入功率-6 000 MW。

6 min—9 min 时段,从站 C 新能源出力增至-7 500 MW。传统方法下,主站 A 因过容而限额至其最大输入功率 3 000 MW;从站 B 由母线馈出功率

1 500 MW;从站 D 储能元件不工作,从直流母线馈出功率 975 MW;为了保证系统正常运行,切除新能源出力-1 275 MW,从站 C 在供给自身负荷后向母线馈入功率-5 475 MW。使用文中方法,从站 D 的储能设施对系统进行功率支援,减少切除新能源的量。主站 A 从母线馈出最大功率 2 850 MW;从站 B 从母线馈出功率 1 500 MW;从站 D 储能设施充电吸收功率 750 MW,从母线馈出功率 1 725 MW;为了保证系统正常运行,切除新能源出力-675 MW,从站 C 向母线馈入功率-6 075 MW。

采用文中方法后,主站 A 和从站 D 的储能可在从站 C 新能源出力过大时及时吸收溢出功率,在保证系统稳定性的同时使总体成本最小。

## 5 结论

文中以柔性直流互联系统为对象,结合传统主从控制策略和功率支援策略,提出一种计及主站容量裕度的柔性直流互联系统主从控制策略,并得到以下结论:

(1) 在采用主从控制的柔性直流互联系统中,负荷突增和新能源出力短时波动等突发工况会导致主站实际功率超过其容量,而传统的功率限幅或调度方法不仅难以及时平抑功率波动,而且可能导致系统的主从站频繁切换,进而使直流侧电压异常,威胁系统正常运行。

(2) 计及主站容量裕度的主从控制策略调整了主站电压环的环路结构与变量定义,增加了基于过容功率的闭合抑制环路,不仅考虑了容量裕度因素,还有效优化了主站的运行机制,保障了主站对直流母线电压的持续调节能力。

(3) 在从站传统运行模式及原有调度方法的基础上引入的从站功率支援机制,不仅能使主站、从站协调运行,有效平抑突发工况下的系统波动,而且能够利用多目标优化模型使系统在功率平衡等约束条件下保证其经济损失最小、源储损耗最小。

### 参考文献:

[1] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[2] 张适宜,周明,黄瀚燕,等. 新能源基地多端柔性直流汇集系统运行灵活性研究[J]. 电网技术,2020,44(10):3846-3857.  
ZHANG Shiyi, ZHOU Ming, HUANG Hanyan, et al. Operational flexibility optimization of renewables generation multi-terminal flexible DC collector system[J]. Power System Technology,

2020, 44(10): 3846-3857.

- [3] 刘增训,游沛羽,周勤勇. 适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J]. 电力工程技术,2020,39(5):59-70.  
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong, et al. Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.
- [4] 李国庆,边竞,王鹤,等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. 高电压技术,2017,43(4):1067-1078.  
LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. Review on DC grids power flow analysis and control[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1067-1078.
- [5] 王思华,赵磊,王建军,等. 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(11):9-17.  
WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 9-17.
- [6] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等. 新能源经柔性直流入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术,2020,46(5):1460-1475.  
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1460-1475.
- [7] 刘泽洪,郭贤珊. 含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J]. 电网技术,2020,44(9):3595-3603.  
LIU Zehong, GUO Xianshan. Operating characteristics research and engineering application of voltage source converter based DC Grid with renewable source connected[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3595-3603.
- [8] 杨晓峰,郑琼林,薛尧,等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术,2016,40(1):1-10.  
YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [9] 耿世平,余敏,郭晓鹏,等. 基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):140-150.  
GENG Shiping, YU Min, GUO Xiaopeng, et al. Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 140-150.
- [10] 汪惟源,窦飞,蔡晖,等. 柔性输电技术在江苏跨江输电通道的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(2):141-146.  
WANG Weiyuan, DOU Fei, CAI Hui, et al. Research on application of flexible AC/DC transmission technologies in yangtze-river-crossing transmission channels of Jiangsu province[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2): 141-146.

- [11] 任昭颖,刘科研,孟晓丽,等. 低压交直流配电网柔性互动系统研究及应用展望[J]. 电力信息与通信技术,2022,20(3):1-11.  
REN Zhaoying,LIU Keyan,MENG Xiaoli,et al. Research and application prospect of flexible interchange system for low voltage AC/DC distribution network[J]. Electric Power Information and Communication Technology,2022,20(3):1-11.
- [12] KARIMIANFARD H,HAGHIGHAT H. Generic resource allocation in distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(1):810-813.
- [13] 朱智恩,曾浩,杨黎明,等. 高载流量柔性直流电缆绝缘料关键性能研究[J]. 电力工程技术,2021,40(4):149-154.  
ZHU Zhien,ZENG Hao,YANG Liming,et al. Investigation on the key properties of flexible HVDC cable insulating materials with the high carrying capacity[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(4):149-154.
- [14] 罗炜,谢超,陈培龙. 柔直系统直流电压测量值偏高影响分析及对策研究[J]. 高压电器,2022,58(3):133-139.  
LUO Wei,XIE Chao,CHEN Peilong. Analysis of the influence factors of high DC voltage measurement value in flexible HVDC system and their countermeasures[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(3):133-139.
- [15] DEWANGAN L,BAHIRAT H J. Comparison of HVDC grid control strategies[C]//2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Bangalore,India. IEEE,2018:1-6.
- [16] KOUTSOUKIS N C,SIACKAS D O,GEORGILAKIS P S,et al. Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2017,14(2):437-448.
- [17] 梅勇,谢惠藩,周剑,等. 特高压三端混合直流功率分配方案[J]. 南方电网技术,2020,14(11):1-5.  
MEI Yong,XIE Huifan,ZHOU Jian,et al. Power distribution method of UHV three-terminal hybrid DC system[J]. Southern Power System Technology,2020,14(11):1-5.
- [18] 祁琪,姜齐荣,许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术,2020,44(12):4664-4676.  
QI Qi,JIANG Qirong,XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology,2020,44(12):4664-4676.
- [19] 李霞林,郭力,黄迪,等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术,2019,45(10):3039-3049.  
LI Xialin,GUO Li,HUANG Di,et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering,2019,45(10):3039-3049.
- [20] 褚海洋,冉学彬,王林,等. MMC功率模块过压故障导致柔性直流闭锁分析[J]. 电力电子技术,2021,55(1):26-29.  
CHU Haiyang,RAN Xuebin,WANG Lin,et al. Analysis of flexible DC blocking caused by MMC power module over-voltage fault[J]. Power Electronics,2021,55(1):26-29.
- [21] 徐政,屠卿瑞,管敏渊. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013:188-275.  
XU Zheng,TU Qingrui,GUAN Minyuan. Flexible DC transmission system[M]. Beijing:China Machine Press,2013:188-275.
- [22] 罗兰,王渝红,陈诗昱,等. 基于虚拟同步发电机控制策略的多端柔性直流系统自适应下垂控制[J]. 科学技术与工程,2021,21(17):7116-7121.  
LUO Lan,WANG Yuhong,CHEN Shiyu,et al. Adaptive droop control of multi-terminal direct current based on virtual synchronous generator control strategy[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(17):7116-7121.
- [23] 陈继开,董飞飞,王振浩,等. 适用于功率波动的多端柔性直流系统改进下垂控制方法[J]. 电网技术,2018,42(11):3708-3717.  
CHEN Jikai,DONG Feifei,WANG Zhenhao,et al. Research on improved droop control method of multi-terminal MMC-HVDC system suitable for power fluctuation[J]. Power System Technology,2018,42(11):3708-3717.
- [24] 徐进,金逸,胡从川,等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4):78-85.  
XU Jin,JIN Yi,HU Congchuan,et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control,2018,46(4):78-85.
- [25] 沙广林,刘斌,邬玮晗,等. 多端柔性互联的交直流配电系统分层控制策略[J]. 高电压技术,2020,46(10):3509-3520.  
SHA Guanglin,LIU Bin,WU Weihang,et al. Hierarchical control strategy for multi-terminal flexible interconnected AC/DC power distribution systems[J]. High Voltage Engineering,2020,46(10):3509-3520.
- [26] 蔡明,陈涛,张松光,等. 多端柔性直流输电系统的功率协调控制策略[J]. 广东电力,2019,32(6):101-107.  
CAI Ming,CHEN Tao,ZHANG Songguang,et al. Power coordinated control strategy for multi-terminal VSC-HVDC transmission system[J]. Guangdong Electric Power,2019,32(6):101-107.
- [27] FELTES C,WREDE H,KOCH F W,et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(3):1537-1546.
- [28] 常非,王一,王一振,等. 基于模块化多电平变换器的高压直流输电故障特性与控制保护[J]. 高电压技术,2015,41(7):2428-2434.  
CHANG Fei,WANG Yi,WANG Yizhen,et al. Faults feature analysis and control protection strategies of modular multilevel converter based high voltage direct current[J]. High Voltage Engineering,2015,41(7):2428-2434.
- [29] 宋强,饶宏. 柔性直流输电换流器的分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2015.

- SONG Qiang, RAO Hong. Analysis and design of the converters in VSC-HVDC system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [30] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [31] 范明烨, 李慧, 刘思嘉, 等. 控制参数对柔性直流电网稳定性的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 43-52.
- FAN Mingye, LI Hui, LIU Sijia, et al. Impact analysis of control parameters on the stability of flexible DC grids [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 43-52.
- [32] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析 [J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
- GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [33] 刘满君, 江轶, 罗金山, 等. 基于灵敏度分析的柔性交直流电网可靠性提升方法 [J]. 电力建设, 2018, 39(2): 58-67.
- LIU Manjun, JIANG Yi, LUO Jinshan, et al. Reliability improvement method of flexible AC/DC power grid based on sensitivity analysis [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 58-67.

作者简介:



王楚扬

王楚扬(1990),男,博士,讲师,研究方向为电力系统中的电力电子装备及电力电子化的电力系统(E-mail:wangchuyang@hhu.edu.cn);  
张秋玥(1999),女,硕士在读,研究方向为电力电子化的电力系统;  
张犁(1985),男,博士,教授,研究方向为新能源变换器拓扑、控制及可靠性。

## Master-slave control strategy of flexible DC interconnection system considering capacity margin of master station

WANG Chuyang, ZHANG Qiuyue, ZHANG Li

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The flexible DC interconnection technology can effectively improve the power quality of the power grid, and enhance the reliability of power supply, thus improving the level of new energy consumption. In a flexible DC interconnection system with master-slave control, sudden load increase and short-term fluctuation in new energy output are likely to cause the actual power of the master station to exceed its capacity. It is difficult to timely suppress power fluctuation through traditional power limiting or scheduling methods, which leads to abnormal DC side voltage and threatens the stable operation of the power system. Therefore, a master-slave control strategy that takes into account the capacity margin of the master station is proposed. The strategy optimizes the operation mechanism of the master station and incorporates the capacity margin factor into the operation mode of the master station to adjust the voltage of the master station. The loop structure and variable definition of the loop are added. A closed suppression loop based on overcapacity power is added, which ensures the continuous regulation ability of the main station to the DC bus voltage. Since the master station needs the coordinated operation among the slave stations when balancing the system power, a power support mechanism among the slave stations is introduced based on the traditional operation mode and original scheduling of the slave stations, and a system under the constraints of system power balance and other constraints is established. The multi-objective optimization model with the smallest system economic loss and the smallest source-storage equipment loss is established, and the non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II) is used to solve the optimization model quickly. Finally, it is verified by simulation that the proposed strategy can effectively prevent the overcapacity of the master station and ensure the stable and efficient operation of the flexible DC interconnection system.

**Keywords:** flexible DC interconnection system; master-slave control; power capacity margin; slave cooperative control; power support; optimal power flow

(编辑 方晶)