

# 考虑控制模式影响的多电压等级 直流电网潮流计算方法

叶希<sup>1</sup>, 陈振<sup>2</sup>, 朱童<sup>1</sup>, 张英敏<sup>3</sup>, 李保宏<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;  
3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610025)

**摘要:** 多电压等级直流电网可满足不同地区接入各类能源和负荷的电压等级需求, 是未来电网建设的发展方向。直流电网潮流分析是电网规划设计、运行控制的基础, 而相比于传统电网潮流分析, 多电压等级直流电网控制方式灵活、运行方式多样, 使得潮流分析更加复杂。计及换流站的控制方式, 首先, 对多电压等级直流电网进行分区处理, 建立了多电压等级直流电网稳态等值模型; 然后, 基于牛顿迭代法建立节点导纳矩阵及潮流方程, 推导了直流电网潮流计算方法; 最后, 基于PSCAD搭建了多端直流电网模型, 验证了所提计算方法的有效性和正确性。

**关键词:** 直流电网; 多电压等级; 控制方式; 潮流计算

中图分类号: TM 744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)06-0034-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230606

## Calculation Method for Power Flow of DC Power Grid with Multi-voltage Levels Considering Influence of Control Modes

YE Xi<sup>1</sup>, CHEN Zhen<sup>2</sup>, ZHU Tong<sup>1</sup>, ZHANG Yingmin<sup>3</sup>, LI Baohong<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610025, Sichuan, China)

**Abstract:** The DC power grid with multi-voltage levels can meet the requirements of voltage level in different regions to connect to various energy sources and loads, and it is the development direction of future power grid construction. Power flow analysis of DC power grid is the basis of grid planning, design and operation control. Compared with traditional power flow analysis, power flow analysis of DC power grid with multi-voltage levels is more complicated due to its flexible control methods and diverse operation modes. Taking into account the control modes of converter station, firstly, the DC power grid with multi-voltage levels is partitioned, and the steady-state equivalent model for DC power grid with multi-voltage levels is established. Then, the node admittance matrix and power flow equation are established based on Newton iterative method, and the power flow calculation method of DC power grid is derived. Finally, a multi-terminal DC grid model is built based on PSCAD, which verifies the validity and correctness of the proposed calculation method.

**Key words:** DC power grid; multi-voltage levels; control mode; power flow calculation

## 0 引言

近年来国际能源供求形势紧张、气候环境不断向不利于人类生存的方向转变<sup>[1-2]</sup>, 这使得优化现

基金项目: 四川省新型电力系统研究院课题(B7199723R005)

有能源结构, 实现能源结构多元化意义重大<sup>[3-4]</sup>。据统计, 截止到2022年年底, 中国已有发电装机容量大致为2560 GW, 风电约占14.45%, 光伏约占15.23%。展望未来, 伴随着可再生能源成本降低以及配套储能技术的进步和成熟, 可再生能源装机有望保持较快增长势头<sup>[5]</sup>。安全、可靠、经济的电

能传输通道是可再生能源规模化发展、远距离输送和消纳的关键。但交流电力系统稳定性等问题随着输送容量和距离的增加变得更加复杂。而基于先进的直流输电技术建立主干电网<sup>[6]</sup>,在远距离、大容量电能输送方面优势明显。

潮流分布在规划电力系统未来扩展方面扮演着关键的角色<sup>[7-8]</sup>。通过分析潮流分布可以确定潮流集中的区域和负载高峰期,从而合理调整电力系统的组成部分,有效提升系统的输电能力和供电可靠性。此外,潮流分布分析还可以揭示系统中可能存在的瓶颈和薄弱环节,为改进和升级电力设备提供指导。对潮流分布进行深入研究和分析,有助于有效评估电力系统的负载需求、优化系统配置,并制定可持续发展的电力规划策略<sup>[9-12]</sup>。

现有潮流计算方法大多以迭代法为核心<sup>[13]</sup>,考虑直流系统的状态变量和控制变量进行迭代求解。文献[14]将潮流分布分解为定电压节点和定功率节点的叠加,通过灵敏度分析,实现了直流电网潮流分布的线性表达。文献[15]提出了一种新的潮流计算表达式,该表达式仅需改变式中的系数即可进行控制方式的转换,具有高效性。文献[16]提出了在下垂控制下,模块化多电平多端直流系统的潮流计算方法,但未指明在扰动及故障时潮流的变化规律。文献[17]在直流电网的稳态潮流计算中引入了基于节点阻抗矩阵的G-S法,能够提高计算精度,收敛性较好。文献[18]建立了电压控制模型,并考虑了换流站损耗对潮流计算的影响。文献[19]提出了针对不同控制方式的潮流计算方法,并推导了在不同控制方式下计算雅可比矩阵和网络参数的方法,该方法适用性较广。但是目前计及直流变压器的多电压等级下直流电网潮流计算较少,在多电压等级直流电网中,不同电压等级的直流系统通过直流变压器相连,探究不同控制方式下的直流变压器损耗和通过的潮流对建立含多个电压等级的直流电网的潮流计算方法有重要意义。

下面首先基于直流变压器、换流站的控制方式,对多电压等级直流电网分区处理,建立了多电压等级直流电网稳态等值模型;然后,在对直流电网节点进行定义和分类的基础上,基于牛顿迭代法建立节点导纳矩阵及潮流方程,推导了直流电网潮流计算方法;最后,基于PSCAD仿真软件,搭建一个三电压等级13端柔性直流电网模型,验证了所提计算方法的有效性和正确性。

## 1 多电压等级直流电网稳态等值模型

### 1.1 换流站和直流系统的稳态等值模型

换流站的等值模型主要包括基于开关函数的数学模型、换流站交直流功率交换规律及控制器模型。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)在工作时是子模块的不断投切实现功率传输,从子模块的投切状态来研究MMC的开关数学模型。换流器控制方法是实现交直流功率交换的重要保障,电压源型换流器的控制方法主要有间接电流控制方法、直接电流控制方法。其中间接电流控制过程相对简单,主要应用于早期的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)直流输电技术中,但由于缺乏电流反馈环节,其动态响应时间较长,系统参数变化对控制稳定性的影响较大。在基于MMC的直流输电技术中,采用 $dq$ 坐标系、PI控制算法的直流电流控制方法受到广泛使用。有功类外环控制器主要有定有功功率控制、定直流电压控制、定交流频率控制。

在数学模型和控制器设计的研究中,设注入到MMC的有功功率 $P$ 等于直流侧功率 $P_{dc}$ 和损耗 $P_{loss}$ 之和

$$P = P_{dc} + P_{loss} \quad (1)$$

换流站损耗 $P_{loss}$ 与传输功率 $P_{dc}$ 间的关系可表征<sup>[20]</sup>为

$$P_{loss} = a \cdot P_{dc}^2 + b \cdot P_{dc} + c \quad (2)$$

式中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为损耗系数。

从稳态潮流计算的角度看,直流系统可以忽略线路中的电感、电容等参数,仅考虑电阻参数即可。基于图论的方法,假定换流站 $i$ 注入直流系统的电流为 $I_{di}$ ,换流站 $i$ 直流出口处电压为 $U_{di}$ ,将换流站直流侧出口类比交流系统中发电机节点,即换流站 $i$ 、换流站 $j$ 等效为节点 $i$ 、节点 $j$ ,且节点 $i$ 与节点 $j$ 间的线路电阻用 $r_{ij}$ 表示,节点 $i$ 与节点 $j$ 间的线路电导用 $G_{ij}$ 表示;基于电路原理中的基尔霍夫定律,换流站节点电压 $U_{di}$ 和节点注入电流 $I_{di}$ 间的关系为

$$I_{di} = \sum_{j=1}^q G_{ij} U_{dj} \quad (3)$$

式中, $q$ 为直流电网节点数。

节点导纳矩阵 $G$ 的元素定义为

$$\begin{cases} G_{ii} = \sum_{j \neq i}^n 1/r_{ij} \\ G_{ij} = 1/r_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 DC/DC 稳态模型及多电压等级直流电网分区方法

重点研究用于高压大功率直流电网 DC/DC 变换器的稳态等值模型。在多电压等级直流电网中为了具备一定的阻断直流故障能力,往往采用如图 1 所示的 MMC 两端口隔离型 DC/DC 变换器拓扑结构。

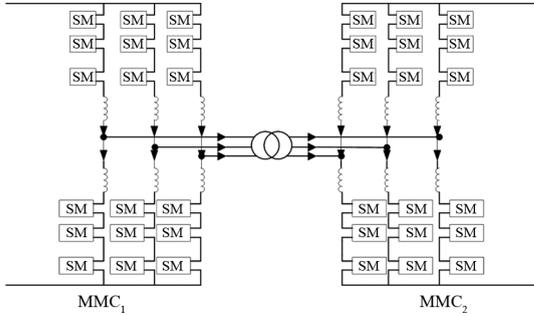


图 1 基于 MMC 的隔离型 DC/DC 拓扑结构

为保证功率的有效传输,这种 MMC 隔离型直流变压器必须有一侧采用定交流系统频率  $f$  与交流系统电压  $v$  控制方式(以下简称 VF 控制),以建立稳定的交流电压;另一侧的  $d$  轴控制可采用定直流电压控制、定有功功率控制或下垂控制等。因而该类型直流变压器一般有 3 种控制模式,分别为:1) VF 控制/定直流电压控制;2) VF 控制/定有功功率控制;3) VF 控制/下垂控制。

直流电网中 DC/DC 稳态模型主要考虑其损耗的等值。由于该类型变压器与换流器相似,采用拟合方法可得到直流变压器损耗与输送功率的函数关系式。

在 PSCAD 中对 13 端系统进行仿真采样,记录所有直流变压器低压侧和高压侧的功率,求差即为换流站和直流变压器的损耗。这里仿真 10 次数据,利用 Matlab 中的拟合模块 curve fitting 进行拟合。变压器定功率值作为自变量,损耗值为因变量。

直流变压器的拟合以 DC/DC1 为例,其二次拟合结果为  $f(x) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3$ ,  $x$  为变量,此处为运行功率。设定:  $p_1 = 5.953e^{-0.5}$ ,  $p_2 = -0.02215$ ,  $p_3 = 4.605$ ,拟合结果如图 2 所示。

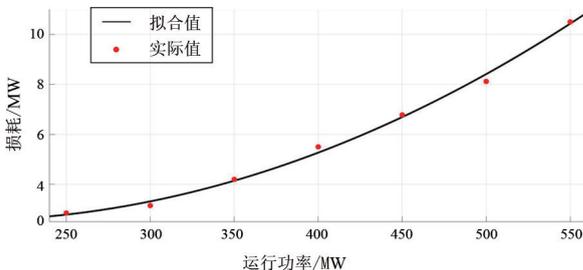


图 2 直流变压器 DC/DC1 二次拟合化

表 1 对损耗拟合结果进行了量化分析,结果表明所提方法误差均在 3% 以下,具有较高的准确度。

表 1 拟合误差

运行功率/ MW	损耗拟合值/ MW	损耗实际值/ MW	拟合误差/%
250	2.79	2.85	2.11
350	4.14	4.20	1.43
450	6.69	6.78	1.33
550	10.43	10.50	0.67

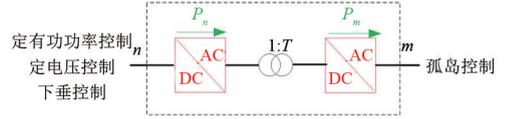


图 3 直流变压器等效模型

其中,假定直流变压器  $m$  侧为 VF 控制, $n$  侧为定有功功率控制、定电压控制或下垂控制中的一种。由于 VF 控制方式是以交流侧频率、交流电压为控制对象,对直流侧有功功率或直流电压无控制能力,考虑直流变压器内部损耗,两侧的功率  $P_n$ 、 $P_m$  为

$$P_n = P_m + P_{\text{loss}} \quad (5)$$

将变压器损耗公式代入式(5)得

$$P_m = -aP_n^2 + (1-b)P_n - c \quad (6)$$

故可将直流变压器等效为一换流站。

直流变压器位于电网中独立母线节点或与换流站并联于同一母线节点。当位于独立母线节点时,直流变压器等效为换流站  $k_1$ ,控制方式取决于  $n$  侧控制方式,如图 4 所示。

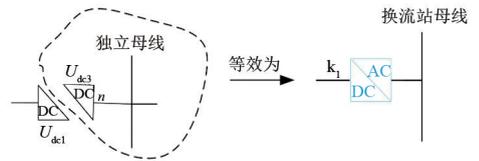


图 4 直流变压器接入独立母线节点

当  $n$  侧与换流站 a 并联于同一母线节点,直流变压器与换流站 a 可共同等效为一个换流站  $k_2$ ,控制方式取决于  $n$  侧换流站与换流站 a,如图 5 所示。

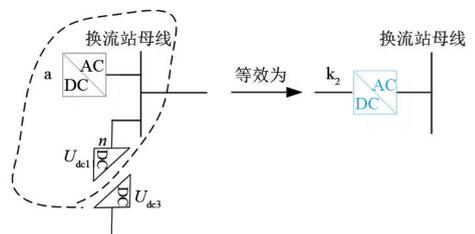


图 5 直流变压器接入换流站母线节点

直流变压器  $m$  侧换流站控制方式主要分为表 2 的 9 种情况。

表 2 换流站控制方式

直流变压器控制	换流站 a	$m$ 侧换流站
定功率控制	定功率控制	定功率控制
	定直流电压控制	定直流电压控制
	下垂控制	下垂控制
下垂控制	定功率控制	下垂控制
	定直流电压控制	定直流电压控制
	下垂控制	下垂控制
定直流电压控制	定功率控制	定直流电压控制
	定直流电压控制	无(不符合规律)
	下垂控制	定直流电压控制

以图 6 为例,由于直流变压器两侧功率  $P_n$ 、 $P_m$  存在如式(5)所示关系,故按电压等级将多电压等级直流电网分区考虑,可将区域 1 的潮流计算结果代入区域 2、区域 3 进行相关的潮流计算。

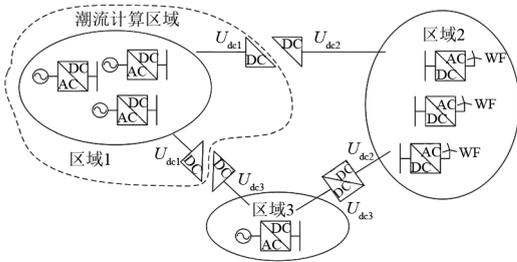


图 6 潮流计算区域

## 2 多电压等级直流电网潮流计算模型

### 2.1 直流电网节点定义及分类

在直流电网中,每条直流母线同样可看作一个节点。然而,为所连接母线提供电压和注入功率的 MMC 换流器可独立控制其注入有功功率和无功功率,这是完全有别于交流系统的特征之一。类似交流系统潮流计算将节点划分 PQ 节点、PV 节点和 V $\theta$  节点,根据 MMC 的不同控制方式,可将直流电网中的节点分为 3 类,以使用不同的潮流方程。即直流节点分为 3 类:类型 I 为定交流有功功率和定直流功率节点,该类节点维持  $P$  跟踪参考值;类型 II 为定直流电压节点,该类节点直流电压  $U_d$  始终恒定;类型 III 为下垂控制节点,该类节点保持  $P_d$  和  $U_d$  满足特定斜率关系。

直流电网的协调控制主要体现为各换流站有功功率控制的相互配合,以此保证系统功率平衡和直流电压稳定。直流电网内至少需包含 1 个功率控制类(I 类或 III 类)节点,且最多有 1 个直流电压控制类(II 类)节点。

目前采用较为广泛的两种协调控制方式是主从运行方式和下垂运行方式。

### 2.2 节点导纳矩阵及潮流方程

直流电网中,接入的储能单元也可看作电源或负荷,如光伏阵列经过 DC/DC 接入,可视为直流电源。与直流负载或电源直接相连的节点处理为恒功率节点,其功率修正方程为

$$\Delta P_{di} = U_{di} \sum_{j=1}^{\lambda} G_{ij} U_{dj} + P_{\text{loss}} - P_{\text{dcLi}} \quad (7)$$

式中: $\Delta P_{di}$  为  $i$  节点直流功率不平衡量; $\lambda$  为与直流负载或电源直接相连的节点数; $P_{\text{dcLi}}$  为  $i$  节点直流负载或电源的直流功率。

与直流负载或电源非直接相连节点中,与 MMC 非直接相连的中间直流节点功率修正方程为

$$\Delta P_{di} = U_{di} \sum_{j=1}^{\gamma} G_{ij} U_{dj} + P_{\text{loss}} \quad (8)$$

式中, $\gamma$  为与直流负载或电源非直接相连的中间节点数。

可采用牛顿-拉夫逊法对上述非线性方程进行迭代求解。直流电网潮流修正方程为:

$$\Delta P_d = J_{dc} \Delta U_d \quad (9)$$

$$U_d^{(k+1)} = U_d^{(k)} + \Delta U_d^{(k)} \quad (10)$$

式中: $\Delta P_d$  为直流节点功率增量向量; $\Delta U_d$  为直流节点功率增量向量; $J_{dc}$  为直流电网雅克比矩阵; $k$  为迭代次数。

采用主从控制时,从换流站节点功率修正方程为

$$\Delta P_{di} = U_{di} \sum_{j=1}^{\eta} G_{ij} U_{dj} + P_{\text{loss}} - P_{\text{dcLi}} \quad (11)$$

式中, $\eta$  为从换流站节点数。

当采用下垂控制时,节点功率修正方程为

$$\Delta P_d = P_d + P_{\text{loss}} - P_{\text{dref}} + K(U_d - U_{\text{dref}}) \quad (12)$$

式中: $P_{\text{dref}}$  为有功功率参考值; $U_{\text{dref}}$  为直流电压参考值; $K$  为下垂控制系统下垂系数。

将式(11)一式(12)中的  $p$  个多元函数在初始值附近分别展开成泰勒级数,并略去  $\Delta U$  的二次及以上阶次的各项便得到:

$$\begin{cases} \Delta P_{d1} = \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d1}} \Delta U_{d1} + \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d2}} \Delta U_{d2} + \cdots + \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{dp}} \Delta U_{dp} \\ \Delta P_{d2} = \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{d1}} \Delta U_{d1} + \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{d2}} \Delta U_{d2} + \cdots + \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{dp}} \Delta U_{dp} \\ \cdots \\ \Delta P_{dn} = \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{d1}} \Delta U_{d1} + \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{d2}} \Delta U_{d2} + \cdots + \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{dp}} \Delta U_{dp} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)写成矩阵形式就如式(9)所示,其中雅可比矩阵  $J_{dc}$  如式(14)所示。

$$J_{dc} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d1}} & \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d2}} & \cdots & \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{dp}} \\ \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{d1}} & \cdots & \cdots & \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{dp}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{d1}} & \cdots & \cdots & \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{dp}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

雅可比矩阵各元素定义为

$$J_{dcxy} = \begin{cases} U_{dx} \cdot G_{xy} & x \neq y \\ \sum_{k=1}^{x-1} G_{xk} \cdot U_{dk} + 2G_{xx} \cdot U_{dx} & x = y \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $J_{dcxy}$  为  $J_{dc}$  中第  $x$  行第  $y$  列的元素。

定直流电压的主换流站是功率平衡站,直流电压恒定,不需要加入迭代中,故而雅可比矩阵  $J_{dc}$  需要降一阶,将对对应直流电压站节点的行列元素删去。

当采用下垂控制时,对应雅可比矩阵各元素定义如下:

$$J_{dcxy} = \begin{cases} U_{dx} \cdot G_{xy} & x \neq y \\ \sum_{k=1}^{x-1} G_{xk} \cdot U_{dk} + 2G_{xx} \cdot U_{dx} + K & x = y \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3 直流电网的潮流计算方法

这里只研究基于牛顿迭代法潮流计算方法的流程框图,如图7所示。

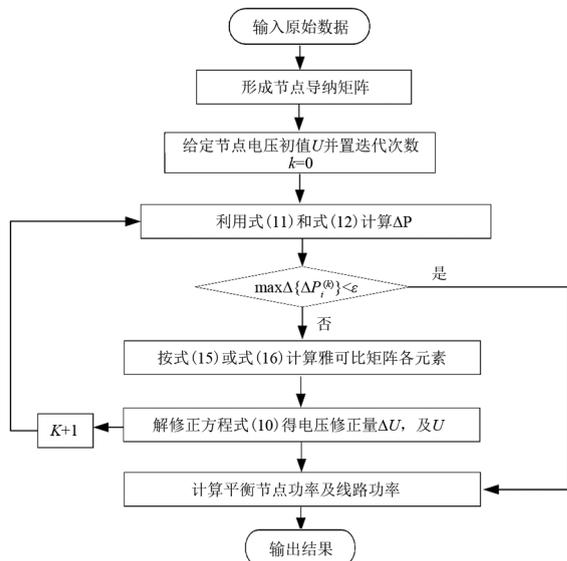


图7 牛顿法潮流计算程序

计算过程为:

- 1) 输入系统原始数据。
- 2) 将多电压等级直流电网分区,构建分区节点导纳矩阵;设定节点电压初值。
- 3) 计算功率修正方程不平衡量  $\Delta P_d$ 。
- 4) 判断相应变量是否达到收敛要求:是,则输出结果,计算结束;否,则继续执行下一步。
- 5) 计算迭代雅可比矩阵  $J_{dc}$  及电压修正量  $\Delta U_d$ 。
- 6) 返回步骤3,继续进行计算。

### 3 仿真验证

为了验证上述多电压等级直流电网潮流计算方法的正确性,现基于 PSCAD 仿真软件,搭建一个三电压等级 13 端柔性直流电网模型,如图8所示。其中各换流站的控制参数如表3所示,直流变压器的控制参数如表4所示。

表3 换流站控制参数

换流站	控制方式	控制参数
MA-1	定有功功率控制	$P_{sref} = -600$ MW
MA-2	下垂控制	$P_{sref} = 800$ MW, $U_{dref} = 640$ kV, $K = 5$
MA-3	下垂控制	$P_{sref} = -1000$ MW, $U_{dref} = 640$ kV, $K = 7$
MA-4	定有功功率控制	$P_{sref} = 700$ MW
MB-1	定有功功率控制	$P_{sref} = 2000$ MW
MB-2	定有功功率控制	$P_{sref} = 600$ MW
MB-3	定有功功率控制	$P_{sref} = 450$ MW
MB-4	定有功功率控制	$P_{sref} = -1500$ MW
MB-5	定直流电压控制	$U_{dref} = 800$ kV
MC-1	定有功功率控制	$P_{sref} = -350$ MW
MC-2	定有功功率控制	$P_{sref} = 600$ MW
MC-3	定有功功率控制	$P_{sref} = 250$ MW
MC-4	定直流电压控制	$U_{dref} = 400$ kV

表4 直流变压器控制方式

直流变压器	高压侧	低压侧
DC/DC1	VF 控制	下垂控制 ( $P_{sref} = 100$ MW, $U_{dref} = 640$ kV, $K = 6$ )
DC/DC2	VF 控制	定有功功率控制 ( $P_{sref} = 300$ MW)

根据多电压等级直流电网分区方法,将图8划分为3个分区,如图8中虚框所示。根据与直流变压器相连的换流站节点等效方法,换流站 MA-4、

MB-1、MC-2 与直流变压器直接相连,DC/DC2 高压侧与独立母线 BB-4 相连,对应的等效换流站的控制方式及参数如表 5 所示。

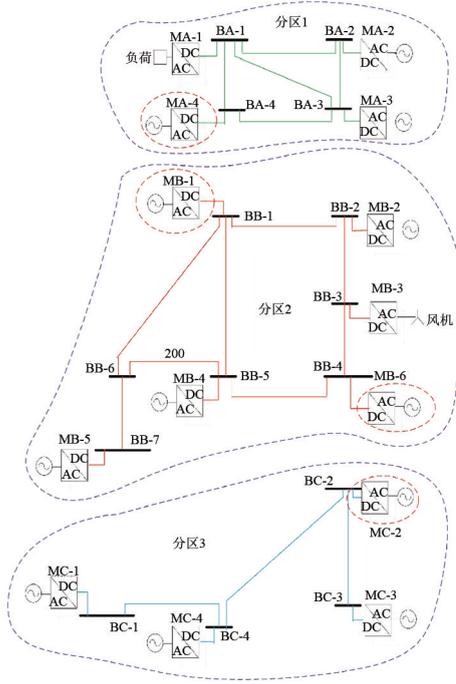


图 8 13 端多电压等级直流电网拓扑结构及计算分区模型

表 5 等效换流站节点控制参数

等效换流站	控制方式	控制参数
MA-4	下垂控制	$P_{sref} = 800 \text{ MW},$ $U_{dref} = 640 \text{ kV}, K = 6$
MB-1	定有功功率控制	$P_{sref} = 2000 - a_1 [100 +$ $6(640 - U_{dA-4})] 2 +$ $(1 - b_1) [100 + 6(640 - U_{dA-4})] - c_1$
MC-2	定有功功率控制	$P_{sref} = 900 \text{ MW}$
MB-6	定有功功率控制	$P_{sref} = -a_2 \times 3002 + 300 \times (1 - b_2) - c_2$

表 5 中:  $a_1, b_1, c_1$  和  $a_2, b_2, c_2$  分别为直流变压器 DC/DC1 和 DC/DC2 损耗系数;  $U_{dA-4}$  为潮流计算中节点 BA-4 的直流电压迭代结果。

该潮流计算方法线路潮流计算结果与 PSCAD 仿真值的对比如表 6 所示。从表 6 可看出,线路潮流计算结果与仿真值的差值均在 1% 以内。产生误差的主要原因是换流器、直流变压器器的损耗由拟合函数求得,与实际损耗存在一定的误差;次要原因是牛顿迭代法存在固有的截断误差。但计算结果与仿真值可观的吻合度验证了所提多电压等级直流电网潮流计算方法的正确性。

表 6 线路的潮流计算结果与仿真值对比

线路	计算值/MW	仿真值/MW	误差/%
BA-1—BA-2	-382	-380	0.526
BA-1—BA-4	-231	-230	0.435
BA-2—BA-3	351	350	0.286
BA-2—BA-4	60	60	0
BA-3—BA-4	-613	-615	0.325
BB-1—BB-2	-177	-178	0.562
BB-1—BB-5	883	882	0.113
BB-1—BB-6	1350	1346	0.297
BB-2—BB-3	390	392	0.51
BB-3—BB-4	833	831	0.241
BB-4—BB-5	512	510	0.392
BB-5—BB-6	-170	-170	0
BB-6—BB-7	1163	1160	0.259
BC-1—BC-4	-360	-359	0.279
BC-2—BC-3	-241	-241	0
BC-2—BC-4	1130	1129	0.089

## 4 结 论

上面研究基于 MMC 的多端直流电网潮流计算问题,主要内容包含以下两个方面:

- 1) 基于直流变压器、换流站的控制方式,对多电压等级直流电网分区处理,建立了多电压等级直流电网稳态等值模型;
- 2) 根据所提多电压等级直流电网分区方法,基于牛顿迭代法建立节点导纳矩阵及潮流方程,推导了直流电网潮流计算方法,并在 13 端直流电网上验证了所提方法的正确性。

### 参考文献

- [1] 杨宇,于宏源,鲁刚,等.世界能源百年变局与国家能源安全[J].自然资源学报,2020,35(11):2803-2820.
- [2] NIKMEHR N, RAVADANEGH S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids [J].IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(4):1648-1657.
- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
- [4] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.
- [5] 朱妍.储能是构建新型电力系统的必要环节[N].中国能源报,2023-01-16(7).
- [6] 安婷,刘栋,常彬,等.2020 年国际大电网会议学术动态—直流系统及电力电子[J].电力系统自动化,2021,45(1):141-149.
- [7] 陈可,张英敏,李俊松.直流电网网架结构对潮流分布

- 的影响研究[J].电测与仪表,2020,57(19):14-20.
- [8] 朱大锐,王睿,程文姬,等.基于改进 PageRank 算法的输电网关键节点辨识方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(5):86-93.
- [9] 罗志刚,韦钢,袁洪涛,等.基于区间直觉模糊理论的直流配网规划方案综合决策[J].电工技术学报,2019,34(10):2011-2021.
- [10] TABARI M, YAZDANI A. An energy management strategy for a DC distribution system for power system integration of plug-in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 659-668.
- [11] 廖建权,周念成,王强钢,等.直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6847-6860.
- [12] JIA Ke, XUAN Zhenwen, FENG Tao, et al. Transient high-frequency impedance comparison-based protection for flexible DC distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 323-333.
- [13] 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.
- [14] 许丹,王斌,张晓天,等.考虑节点控制模式的柔性直流电网潮流线性化计算方法[J].电力系统自动化,2017,41(19):54-58.
- [15] 柴润泽,窦竟铭,张保会.含电压源换流器的交直流混合电网潮流统一表达与可行解求取[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1260-1268.
- [16] 张朝学,邹晓松,余梦天,等.基于电压下垂控制的含 MMC 直流电网潮流计算方法研究[J].电力科学与工程,2018,34(11):1-7.
- [17] 孙银锋,吴学光,汤广福,等.基于节点阻抗矩阵 GS 法的直流电网稳态潮流计算[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1882-1892.
- [18] 杨堤,程浩忠,姚良忠,等.基于电压控制特性的电压源型多端直流/交流系统潮流求解[J].电力系统自动化,2016,40(6):42-48.
- [19] 和敬涵,李智诚,王小君,等.计及多种控制方式的直流电网潮流计算方法[J].电网技术,2016,40(3):712-718.
- [20] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2010.

#### 作者简介:

叶 希(1987),女,博士,高级工程师,从事电网调度运行相关工作;

陈 振(1991),男,博士,高级工程师,从事电网智能调度运行研究;

朱 童(1992),男,硕士,工程师,从事电网调度运行工作。

(收稿日期:2023-05-29)

(上接第 33 页)

- [14] 谢宏文,查浩,陈庆文,等.一种使用 CALSTM 模型进行短期光伏功率预测的方法[J].供用电,2020,37(12):61-66.
- [15] 王继东,宋智林,冉冉.基于改进支持向量机算法的光伏发电短期功率滚动预测[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(11):9-13.
- [16] 于秋玲,许长清,李珊,等.基于模糊聚类和支持向量机的短期光伏功率预测[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(12):115-118.
- [17] 马骏,江锐,丁倩,等.基于多元宇宙优化支持向量机的短期光伏发电功率预测[J].热力发电,2020,49(4):87-92.
- [18] 魏鹏飞,樊小朝,史瑞静,等.基于改进麻雀搜索算法优化支持向量机的短期光伏发电功率预测[J].热力发电,2021,50(12):74-79.
- [19] 王鹏翔,沈娟,王菁昉,等.基于 PCA-LMD-WOA-ELM 的短期光伏功率预测[J].智慧电力,2022,50(6):72-78.
- [20] 谭海旺,杨启亮,邢建春,等.基于 XGBoost-LSTM 组合模型的光伏出力预测[J].太阳能学报,2022,43(8):75-81.
- [21] NARUEI I, KEYNIA F. A new optimization method based on coot bird natural life model[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 183(2): 115352.
- [22] 陈晓华,吴杰康,陈盛语,等.基于 EMD 和 IABC-SVM 算法的复合电压暂降源辨识方法[J].广东电力,2022,35(2):11-18.
- [23] 陈晓华,王志平,吴杰康,等.基于 VMD 和 IAO-SVM 的电压暂降源识别方法[J].广东电力,2023,36(1):59-67.
- [24] CHEN Xiaohua, WANG Zhiping, HONG Mingzhi, et al. Power quality disturbance identification method based on improved GSA-SVM algorithm [C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), IEEE, 2022:191-196.
- [25] 殷豪,张铮,丁伟锋,等.基于生成对抗网络和 LSTM-CSO 的少样本光伏功率短期预测[J].高电压技术,2022,48(11):4342-4351.
- [26] 孟安波,许炫溶,陈嘉铭,等.基于强化学习和组合式深度学习模型的超短期光伏功率预测[J].电网技术,2021,45(12):4721-4728.

#### 作者简介:

陈晓华(1996),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析、电力系统运行与控制、智能算法优化、能源需求预测、备用容量优化、虚拟电厂管控等;

王志平(1978),男,博士,研究员,硕士生导师,研究方向为电力电子装置及控制、智能制造等;

吴杰康(1965),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制等。

(收稿日期:2023-02-21)