

计及多端口直流潮流控制器的直流电网潮流计算

王鹤¹,朱琳¹,单凤军²,边竞¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132000;

2. 江苏省电力检修分公司苏州分部,江苏 苏州 215000)

摘要:基于含模块化多电平换流器的多端口直流潮流控制器(MDCPFC)的工作原理,提出了一种计及MDCPFC的直流电网潮流计算方法。该方法将加装的MDCPFC用安装支路端点的节点注入功率的修正量来表示,使得运算简便,从而提高了运算效率。以舟山五端柔性直流工程为例,通过对比加装MDCPFC直流电网的潮流计算结果与PSAT软件计算结果以及加装2个直流潮流控制器的计算结果,验证MDCPFC的控制效果更好。

关键词:直流电网;模块化多电平换流器;多端口直流潮流控制器;潮流计算

中图分类号:TM 721.1

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.002

0 引言

与传统直流输电相比,柔性直流输电能够有效地改善新能源发电功率的波动性对电网运行的影响,是当前国际公认的解决新能源发电并网问题的有效技术方案之一^[1-3]。柔性直流输电技术的发展经历了“双端-多端-直流电网”的发展历程^[4]。通过引入直流断路器,大幅减少了直流电网换流站的数量,其具有重大的经济意义,但换流站的减小和直流线路的自由连接也带来了潮流控制自由度降低的问题^[5-6]。在含有 N_1 个换流站的直流电网中,有且仅有 N_1-1 条支路的潮流能够通过换流站进行控制,其余支路潮流均不可控。潮流分布的不合理将引发线路过载,导致直流电网低效率运行或者带来严重的安全隐患^[7]。

针对直流潮流控制器 DCPFC (Direct Current Power Flow Controller) 的研究对提高直流电网潮流控制的自由度、保障直流电网的安全稳定运行具有重要的实际意义。目前提出的 DCPFC 主要有 3 类^[8]: 可变串联电阻器型、直流变压器型和串联电压源型。文献[9-10]介绍了 3 种 DCPFC 的拓扑结构和工作原理,并分析了它们各自的功率损耗、调节范围和额定工况。文献[11-13]重点研究了串联电压源型 DCPFC 的功率损耗、调节范围和额定工况。原理为在支路中串联一个电压源,串联电压源的电压值可正可负,其控制灵活性好、功率额定值低、损耗小。文献[14]提出了一种 DCPFC 的配置方法,在扩大潮流运行空间、保障系统安全运行的基础上,保证了潮流的均衡分布。文献[15]通过引入 DCPFC 降低系统网损,并以直流网损最小化为目标进行

DCPFC 的配置和变比计算。文献[16]在进行含 DCPFC 的直流电网潮流计算时,利用等效注入功率法避免了引入新节点的大量计算。文献[17]针对换流站采用多点电压下垂控制的直流电网,提出了一种 DCPFC 的优化配置及变比计算方法。文献[18]设计了基于模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 结构的辅助电压源型 DCPFC,在线路中串入正的或负的电压来调节直流系统的功率分布,其控制灵活、电压等级较低。文献[19]提出了确定电流灵敏度值的调整方向及计算调整量的方法,最终得到了基于灵敏度分析法的 DCPFC 配置原则。文献[20]给出了含电压源型换流器(VSC)交直流网络的统一模型,通过附加非零元素解决了雅可比矩阵非结构堆成问题。文献[21]采用内点法研究了最优潮流分布的概率分布和数字特征,内点法在收敛性和鲁棒性方面具有优越性,但其收敛性差、计算速度慢。

现有研究大多针对双端口 DCPFC,只能辅助控制一条线路的直流潮流,在含有多个环网的复杂直流电网中需要在多条线路上同时安装多个 DCPFC 并进行协调控制,实现成本较高且可靠性较低,并且现有潮流计算研究所采用的模型与直流电网均不相同。针对上述应用场景,可以考虑在直流电网中加装基于 MMC 的多端口直流潮流控制器 MDCPFC (Multi-port DC Power Flow Controller),同时实现对多条支路潮流的控制。

本文对 MDCPFC 的工作原理进行了研究,推导了一般直流电网安装基于 MMC 的 MDCPFC 后的基尔霍夫方程组,得到了 MDCPFC 的等效电路模型;在此基础上,提出了一种计及 MDCPFC 的直流电网潮流计算方法,并将加装 MDCPFC 之后直流网络发生的变化用安装支路端点的节点注入功率的修正量来表示,使得运算简便,从而提高了运算效率;以改造后的舟山五端柔性直流系统为例,验证 MDCPFC

收稿日期:2017-07-24;修回日期:2018-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507029,51507023)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507029,51507023)

的控制效果以及本文方法的有效性。

1 MDCPFC 的工作原理

MDCPFC 可以由 DCPFC 扩展而来,对 3 种普通 DCPFC 进行分析,其原理图见附录中图 A1。可变串联电阻器型 DCPFC 见图 A1(a),将电阻串联到电路中,在每个电阻上并联一个开关,通过控制开关的开通和关断,改变串联到电路的电阻值,最终实现潮流控制,但是该方法只能改变其安装电路上的电流,并且功率损耗较大,在实际应用中不常选用。直流变压器型 DCPFC 见图 A1(b),通过升压或降压调整支路电压,从而调节支路电流,但存在额定容量高、功率损耗大、经济性较差的问题,不宜推广。辅助电压源型 DCPFC 见图 A1(c),辅助电压源型 DCPFC 直接接入电路中,若只考虑其外部特性,辅助电压源型 DCPFC 可以等效为一个串联电压源,通过改变其值的正负和大小,最终实现支路之间潮流的实际分配,在费用、功率损耗和控制方面具有一定的优势。

在含有多个环网的复杂直流系统中,需要在多条线路上同时安装多个 DCPFC,并进行协调控制,实现成本较高且可靠性较低。在如附录中图 A2 所示的舟山五端系统中,要想控制整个直流系统的潮流分布,至少需要在 L_{14} 、 L_{34} 上加装 2 个辅助电压源型 DCPFC。并且,辅助电压源型 DCPFC 需要与外部交流系统进行功率交换,绝缘要求高,增加了系统的复杂性。

文献[18]在传统 DCPFC 的基础上,提出了 MD-CPFC,其由 MMC 和交流变压器组合而成。以三端口的 MDCPFC 为例,其拓扑结构如附录中图 A3 所示。该拓扑的特点是:将 MDCPFC 的直流侧串联到线路中,在线路上额外增加电压改变线路压降,实现功率调节的目的;交流侧无需外部取能,其自身通过交流变压器连接就能够实现内部能量交换,实现能量平衡。同时其具有额外损耗小、阶跃电压低、输出波形质量高和高度模块化等优点。并且可安装在多条线路上,起到同时安装多个 DCPFC 的效果。文献[18]仅分析了 MDCPFC 的拓扑结构和控制方法,下面以附录中图 A4 为例,从电路的角度出发详细分析 MDCPFC 接入后对直流电网潮流的影响。图 A4 为三端 MDCPFC 用于舟山五端柔性直流输电系统示意图。由图可知,系统由 6 条支路构成,其中有 2 条支路的潮流是不可控的,其内部还包含 2 个环网,潮流控制复杂,故需在岱山站处加装三端 MDCPFC。

直流电网中某支路电压降和传输功率之间的关系如式(1)所示。通过改变 ΔV 或 R_L ,可以使 P_L 发生变化。

$$P_L = V\Delta V/R_L \quad (1)$$

其中, P_L 为支路上的传输功率; V 为换流站电压; ΔV

为支路电压降; R_L 为支路电阻。

将 MDCPFC 等效成在支路 L_{34} 、 L_{14} 、 L_{45} 上分别串联电压源 V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} ,就可以实现调节整个电网潮流的功能。

系统的基尔霍夫方程如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & R_{13} & -R_{14} & 0 & R_{34} & 0 \\ 0 & 0 & R_{14} & -R_{15} & 0 & R_{45} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{13} \\ I_{14} \\ I_{15} \\ I_{34} \\ I_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{M2}-V_{M1} \\ -V_{M2}-V_{M3} \\ I_1 \\ I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

功率方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_1 = V_1 I_1 = V_1 \left(\frac{V_1 - V_2}{R_{12}} + \frac{V_1 - V_3}{R_{13}} + \frac{V_1 - V_{M2} - V_4}{R_{14}} + \frac{V_1 - V_5}{R_{15}} \right) \\ P_2 = -V_2 I_2 = -V_2 \frac{V_1 - V_2}{R_{12}} \\ P_3 = V_3 I_3 = V_3 \left(\frac{V_1 - V_3}{R_{13}} - \frac{V_3 - V_{M1} - V_4}{R_{14}} \right) \\ P_4 = V_4 I_4 = V_4 \left(\frac{V_4 - V_{M3} - V_5}{R_{45}} - \frac{V_3 - V_{M1} - V_4}{R_{34}} - \frac{V_1 - V_{M2} - V_4}{R_{14}} \right) \\ P_5 = -V_5 I_5 = -V_5 \left(\frac{V_1 - V_5}{R_{15}} + \frac{V_4 - V_{M3} - V_5}{R_{45}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

其中, R_{12} 、 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 、 R_{34} 、 R_{45} 为各支路电阻; I_{12} 、 I_{13} 、 I_{14} 、 I_{15} 、 I_{34} 、 I_{45} 为各支路电流; V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} 为 MDCPFC 串联电压; V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 为各换流站母线电压; I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 为各换流站的输出/输入电流; P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 为各个换流站输入/输出的有功功率。

此外,MDCPFC 需满足功率平衡:

$$\sum_{i=1}^3 I_{Mi} V_{Mi} = 0 \quad (4)$$

其中, I_{Mi} 为流过 MDCPFC 端口的电流。

综合分析式(3)和(4)可知,若给定 2 条线路电流,就能够知道 V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} 的大小与方向。

拓展到一般形式,对于任一直流电网,其基尔霍夫方程组如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}_{M \times M} \begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{13} \\ \vdots \end{bmatrix}_{M \times 1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}_{M \times 1} \quad (5)$$

其中, \mathbf{A}_1 为 $(M-N+1) \times M$ 维的矩阵,其元素为线路阻值或 0, N 为线路条数, M 为换流站个数; \mathbf{B}_1 为 $(M-N+1) \times 1$ 维的列阵,其元素为串入直流电压值; \mathbf{A}_2 为 $(N-1) \times M$ 维的方阵,其元素为 ± 1 或 0; \mathbf{B}_2 为

$(N-1) \times 1$ 维的列阵,其元素为换流站流入/流出的电流值。

\mathbf{A} 、 \mathbf{B} 中元素均已知,将式(5)与 MDCPFC 内部功率平衡方程式(4)联立,就可得到在设定直流线路电流时,需串入直流电压的数值 V_{M_i} 。在此基础上,可以将其转化为不同原理下实现 MDCPFC 的具体控制参考值。

2 含 MDCPFC 的直流电网潮流计算方法

下面分析含 MDCPFC 的直流电网潮流计算方法,首先分析 MDCPFC 的潮流计算数学模型。以附录中图 A4 的 MDCPFC 为例,假设 MDCPFC 加装在支路 L_{14} 、 L_{34} 、 L_{45} 上,控制支路 L_{14} 、 L_{45} 电流, V_{M1} 为辅助调节基准电压, MDCPFC 等效成在支路 L_{34} 、 L_{14} 、 L_{45} 上分别串联电压源 V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} 。由第 1 节可知,给定 2 条线路电流,就能够知道 V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} 的大小与方向。若仅考虑外部特性, MDCPFC 可以等效为在支路 L_{14} 、 L_{45} 中加装 2 个理想变压器,用 k_{m1} 和 k_{m2} 表示理想变压器的变比,则其值可表示为:

$$\begin{aligned} k_{m1} &= \frac{\Delta V_{s1}}{V_1} = \frac{V_1 + V_{M2} - V_{M1}}{V_1} \\ k_{m2} &= \frac{\Delta V_{s2}}{V_1} = \frac{V_1 + V_{M3} - V_{M1}}{V_1} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, ΔV_{s1} 和 ΔV_{s2} 分别为支路 L_{14} 和 L_{45} 两端的电压降。

在此基础上,推导含 MDCPFC 的直流电网潮流计算方法。假设某一个直流电网有 n 个节点,所有直流母线有以下功率限制关系。

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = V_i I_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, P_i 为节点 i 的注入功率; P_{Gi} 为负载注入功率; P_{Li} 为负载吸收功率; I_i 为由发电机和负载注入直流母线的净电流。

节点 i 的净注入电流 I_i 和母线电压 V_i 有关,可由式(8)表示。

$$\mathbf{I} = \mathbf{G}\mathbf{V} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n]^T$ 和 $\mathbf{V} = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]^T$ 分别为直流网络节点的注入电流和直流母线的电压向量; \mathbf{G} 为网络的电导矩阵。 \mathbf{G} 的元素 G_{ij} 可以表示为:

$$G_{ij} = -g_{ij} \quad (9)$$

其中, g_{ij} ($i \neq j$) 为节点 i 和 j 之间的互电导。电网中所有节点的注入功率可以用式(10)表示。

$$P_i = V_i \sum_{j \in N_i} I_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中, N_i 为与节点 i 连接的所有节点的集合; I_{ij} 为支路 L_{ij} 上的电流,方向为由节点 i 流向节点 j 。

采用牛顿法解决直流潮流问题,给定净注入功

率 ($P_i = P_i^*$), 给定直流电压值 ($V_i = V_i^*$), 不计网损, 假设节点 1 作为平衡节点, 功率不平衡量 $\Delta \mathbf{P}$ 可由式(11)计算得到。

$$\Delta P_i = P_i^* - V_i \sum_j G_{ij} V_{ij} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

更新直流功率的状态变量, 进行迭代计算, 状态变量更新表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{V}^k = (\mathbf{J}^k)^{-1} + \Delta \mathbf{P}^k \\ \mathbf{V}^{k+1} = \mathbf{V}^k + \Delta \mathbf{V}^k \end{cases} \quad (12)$$

其中, \mathbf{J} 为多端口直流潮流问题中的雅可比矩阵。直到 $\max \Delta P_i < \varepsilon$, 停止迭代, 计算得到节点功率、线路电流等。

不考虑网损, 假设与节点 P 相连的支路有 m 条 ($m \leq n$), 在节点 P 上加装一个 m 端口的 MDCPFC, 则可以等效为加装了 m 个电压源, 若仅考虑外部特性, 可以等效为 $m-1$ 个理想电压源。但是仅仅是与节点 P 相连的支路的电流和节点 P 功率以及与节点 P 相连的支路的注入功率发生变化, 其余支路的电流和功率保持不变。加装 MDCPFC 之后的等效电路图如图 1 所示, 则与节点 P 相连的各支路电流为:

$$I_{px} = -[k_{(m-1)x} V_p - V_x] G_{px} \quad p = 1, 2, \dots, n; x = 1, 2, \dots, m-1 \quad (13)$$

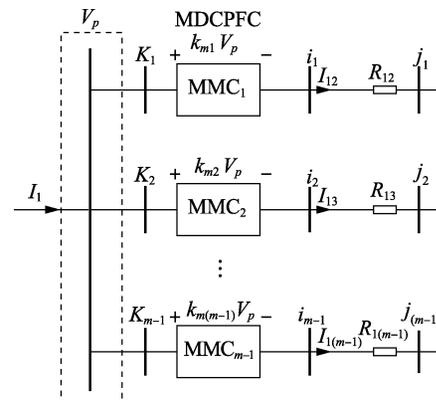


图1 加装 MDCPFC 之后的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit after installation of MDCPFC

节点 P 及与其相连支路的注入功率分别为:

$$\begin{cases} P_p = U_p \left[\sum_{x \in N_p, x \neq q} I_{px} + \sum_{x=1}^m k_{mx} \left(\sum_{x=1}^m k_{mx} V_p - V_{ix} \right) (-G_{ixjx}) \right] \\ P_{ixjx} = U_{ix} \left[\sum_{x \in N_q, x \neq p} I_{px} + (V_x - k_{mx} V_p) (-G_{px}) \right] \end{cases} \quad (14)$$

其中, P_{ixjx} 为从支路 ix 到 jx 的功率。

在直流电网中加装 MDCPFC 会使得系统的节点数增多, 所列写的节点导纳矩阵和雅可比矩阵的阶数也会随之增加, 矩阵中某些元素发生改变, 使得潮流计算变得非常复杂。为解决上述问题, 将加装 MDCPFC 之后直流网络发生的变化用安装支路端点

的节点注入功率的修正量来表示。

$$\begin{cases} \Delta P_p = V_p \left[\sum_{x=1}^m k_{mx} \left(\sum_{x=1}^m k_{mx} V_p - V_x \right) (-G_{ixjx}) \right] \\ \Delta P_{ixjx} = V_{ix} \left[\left(V_{ix} - k_{mx} V_p \right) (-G_{ixjx}) \right] \end{cases} \quad (15)$$

将其代入牛顿法进行潮流计算,流程图见图 2。

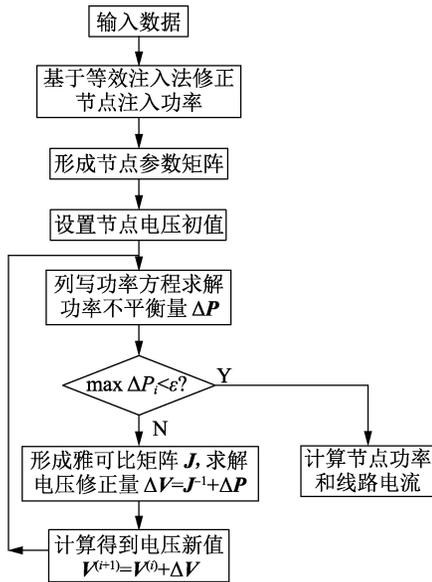


图 2 潮流计算流程图

Fig.2 Flowchart of power flow calculation

综上,在直流电网中加装 MDCPFC 解决了在含有多个环网的复杂直流电网中需要在多条线路上同时安装多个 DCPFC 并进行协调控制,实现成本较高且可靠性较低的问题。本文提出的计及 MDCPFC 的直流电网潮流计算方法,将加装 MDCPFC 之后直流网络发生的变化用安装支路端点的节点注入功率的修正量表示,使得运算简便,提高了运算效率。

3 算例分析

3.1 算例系统介绍

本节以修改的舟山五端直流系统为例,对所提方法进行验证,系统图如附录中图 A5 所示。图中洋山岛换流站采用 400 kV 定电压控制,舟山本岛换流站和岱山岛换流站采用 250 MW 定有功功率控制,衡山岛换流站采用 100 MW 定有功功率控制,泗礁岛换流站采用 -100 MW 定有功功率控制。系统参数如表 1 所示,表中 P_{ref} 为各换流站的参考功率,泗礁岛换流站的额定功率值为负表示泗礁岛换流站从直流系统向交流系统注入有功功率。

3.2 加装 1 个 MDCPFC

本文采用等效注入功率法进行直流电网的潮流计算。因直流电网的支路电阻小、工作电压高,电压很小的变化会使得电流发生较大的改变,所以允许

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

| 节点 | 控制模式 | P_{ref}/MW | 支路 | 长度/km | 电阻/ Ω | 载流限值/A |
|----|------|--------------|-----------------|-------|--------------|--------|
| 1 | 定电压 | — | L ₁₂ | 40 | 1.202 00 | 556 |
| 2 | 定有功 | -100 | L ₁₃ | 77 | 2.313 90 | 556 |
| 3 | 定有功 | 250 | L ₁₅ | 20 | 0.601 00 | 556 |
| 4 | 定有功 | 250 | L ₁₄ | 39 | 0.343 20 | 1 150 |
| 5 | 定有功 | 100 | L ₃₄ | 35 | 1.105 18 | 556 |
| | | | L ₄₅ | 17 | 0.510 90 | 556 |

MDCPFC 的输出电压与额定电压相比存在 $\pm 10\%$ 的误差。附录中图 A6 为在舟山五端直流系统中在靠近岱山岛换流站处加装了 1 个三端口的 MDCPFC。在保证支路电流不过载的前提下改变 MDCPFC 的变比,进行控制。

控制 $I_{14} = 800 \times (1 \pm 5\%) A$ 、 $I_{45} = 150 \times (1 \pm 5\%) A$, 则可调节 MDCPFC 的 $V_{M1} = 0.044 8 V$ 、 $V_{M2} = 0.04 V$, 此时 MDCPFC 的变比 $k_{m1} = 1.000 112$ 、 $k_{m2} = 1.000 1$ 。在 PSAT 仿真软件中搭建五端柔性直流系统模型,比较分析采用等效注入功率法所得的计算结果和 PSAT 软件的结果,具体潮流计算结果如表 2 所示。可见,本文提出的潮流计算方法具有较高的计算精度。

表 2 加装 1 个 MDCPFC 潮流计算结果

Table 2 Power flow calculation results with a MDCPFC

| 节点 | 节点电压/kV | | 偏差/% | 支路 | 支路电流/A | | 偏差/% |
|----|---------|---------|---------|-----------------|--------|-------|------|
| | 仿真 | 程序 | | | 仿真 | 程序 | |
| 1 | 400.000 | 399.981 | 0.004 7 | L ₁₂ | 250.3 | 248.8 | 0.60 |
| 2 | 399.700 | 399.699 | 0.002 5 | L ₁₄ | 804.9 | 805.1 | 0.02 |
| 3 | 400.537 | 400.529 | 0.002 2 | L ₁₅ | 403.5 | 403.1 | 0.10 |
| 4 | 400.329 | 399.981 | 0.002 4 | L ₁₃ | 209.5 | 209.5 | 0 |
| 5 | 400.294 | 400.290 | 0.009 9 | L ₃₄ | 403.5 | 403.1 | 0.10 |
| | | | | L ₄₅ | 153.3 | 153.3 | 0 |

3.3 加装 2 个 DCPFC

在支路 L₁₄ 和 L₄₅ 靠近岱山站侧加装 2 个 DCPFC, 系统图如附录中图 A7 所示。

控制 $I_{14} = 800 \times (1 \pm 1\%) A$ 、 $I_{45} = 150 \times (1 \pm 5\%) A$, 可调节 DCPFC₁ 使 $V_M = 0.045 216 V$, 调节 DCPFC₂ 使 $V'_M = 0.040 8 V$, 此时 DCPFC₁ 的变比为 1.000 110 34, DCPFC₂ 的变比为 1.000 102。计算所得结果与加装 1 个 MDCPFC 的结果对比见表 3, 分析表 3 数据

表 3 加装 1 个 MDCPFC 和 2 个 DCPFC 的潮流计算结果对比

Table 3 Comparison between power flow calculation results with a MDCPFC and two DCPFCs

| 节点 | 节点电压/kV | | | 支路 | 支路电流/A | | 偏差/% |
|----|---------|---------|---------|-----------------|--------|-------|-------|
| | MDCPFC | DCPFC | 偏差 | | MDCPFC | DCPFC | |
| 1 | 400.000 | 400.675 | 0.001 6 | L ₁₂ | 250.3 | 249.4 | 0.36 |
| 2 | 399.700 | 400.004 | 0.000 7 | L ₁₃ | 290.5 | 292.5 | 0.68 |
| 3 | 400.537 | 400.263 | 0.000 7 | L ₁₄ | 804.9 | 830.5 | 3.18 |
| 4 | 400.329 | 400.001 | 0.000 9 | L ₁₅ | 403.5 | 357.0 | 11.52 |
| 5 | 400.294 | 399.699 | 0.001 4 | L ₃₄ | 333.4 | 330.9 | 0.75 |
| | | | | L ₄₅ | 153.3 | 125.4 | 18.20 |

可得,加装 1 个 MDCPFC 的控制效果和加装 2 个 DCPFC 相似,证明了 MDCPFC 的经济性。

4 结论

本文首先分析了 MDCPFC 的应用场景和工作原理。与多个 DCPFC 相比,MDCPFC 的实现成本更低,也省去了多个 DCPFC 的协调控制。在此基础上,提出了含 MDCPFC 的直流电网潮流计算方法,并将加装 MDCPFC 之后直流网络发生的变化用安装支路端点的节点注入功率的修正量来表示,使得运算简便,提高了运算效率。最后,以舟山五端直流输电系统为例,通过对比该潮流计算方法所得结果与 PSAT 中潮流计算结果,证明本文方法的有效性,再将其结果和加装 2 个 DCPFC 进行对比,验证了 MDCPFC 的控制效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [2] 孙玉娇,周勤勇,申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术,2013,37(7):1929-1935.
SUN Yujiao, ZHOU Qinyong, SHEN Hong. Analysis and prospect on development patterns of China's power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1929-1935.
- [3] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [4] 汤广福. 高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J]. 电网技术,2012,36(1):1-6.
TANG Guangfu. R&D and application of key technologies for HVDC equipment[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 1-6.
- [5] 姚美齐,李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术,2014,38(3):549-555.
YAO Meiqi, LI Naihu. An introduction to European supergrid and its solutions[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 549-555.
- [6] ASPLUND G, LINDÉN K, BARKER C, et al. HVDC grid feasibility study[J]. Electra, 2013, 267: 50-59.
- [7] JOVCIC D, HAJIAN M, ZHANG H, et al. Power flow control in DC transmission grids using mechanical and semiconductor based DC/DC devices[C]//10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK: IET, 2013: 1-6.
- [8] BARKER C D, WHITEHOUSE R S. A current flow controller for use in HVDC grids[C]//10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK: IET, 2012: 1-5.
- [9] MU Q, LIANG J, LI Y, et al. Power flow control devices in DC grids[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [10] JOVCIC D. Bidirectional, high-power DC transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2276-2283.
- [11] MOHAMED A, MOHAMMED O. Power flow control in DC distribution systems[C]//North American Power Symposium (NAPS). Arlington, TX, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [12] VEILLEUX E, OOI B T. Multiterminal HVDC with thyristor power-flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1205-1212.
- [13] VEILLEUX E, OOI B T. Multi-terminal HVDC grid with power flow controllability[C]//CIGRE. Paris, France: IEEE, 2012: 1-12.
- [14] 杨越,张文亮,汤广福,等. 直流电网潮流控制器的配置方法[J]. 电网技术,2015,39(8):2210-2216.
YANG Yue, ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, et al. Collocating method of power flow controllers for DC grids[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2210-2216.
- [15] 李琼,吴小刚,姚良忠,等. 潮流控制器对直流电网运行网损影响分析[J]. 电网技术,2016,40(6):1736-1742.
LI Yan, WU Xiaogang, YAO Liangzhong, et al. Study on effects of DC power flow controller on DC transmission loss[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1736-1742.
- [16] 龙超,李国庆,孙银锋,等. 基于等效注入功率法的含直流潮流控制器的直流电网潮流计算方法研究[J]. 智能电网,2015,3(3):208-213.
LONG Chao, LI Guoqing, SUN Yingfeng, et al. Power flow calculation of DC grid with DC power flow controller based on equivalent power injection method[J]. Smart Grid, 2015, 3(3): 208-213.
- [17] 王第成,胡林献,邱迪. 电压型直流潮流控制器优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):78-83.
WANG Dicheng, HU Linxian, QIU Di. Optimal locating method of voltage-type DC power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 78-83.
- [18] 许烽,徐政. 一种适用于多端直流系统的模块化多电平潮流控制器[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):95-102.
XU Feng, XU Zheng. A modular multilevel power flow controller for-multi-terminal HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 95-102.
- [19] 李国庆,龙超,孙银锋,等. 直流潮流控制器对直流电网的影响及其选址[J]. 电网技术,2015,39(7):1786-1792.
LI Guoqing, LONG Chao, SUN Yinfeng, et al. Impact and location analysis of DC power flow controller on DC grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1786-1792.
- [20] 鲍威,凌卫家,张静,等. 含 VSC-MTDC 的交直流混合电网潮流计算模型及稀疏性处理技术[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):43-48.
BAO Wei, LING Weijia, ZHANG Jing, et al. Power flow calculation model and sparse matrix disposal techniques for AC/DC hybrid power system with VSC-MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 43-48.
- [21] 李逸驰,孙国强,杨义,等. 含经 VSC-HVDC 并网海上风电场的交直流系统概率最优潮流[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):136-142.
LI Yichi, SUN Guoqiang, YANG Yi, et al. Probabilistic optimal power flow of AC/DC system with offshore wind farm connected to grid via VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 136-142.

Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG

HU Wenqiang¹, WU Zaijun¹, SUN Chongbo², SONG Yi², YUAN Kai²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Starting from the corresponding relationship between the main circuit of grid-connected inverter and the equivalent circuit of synchronous generator, the outer loop control strategy of VSG (Virtual Synchronous Generator) is proposed to simulate the motion equation, active power-frequency droop characteristic and reactive power-voltage droop characteristic of the synchronous generator rotor. The virtual impedance is introduced to simulate the voltage loop of synchronous generator stator's electrical equation, which, combined with the quasi proportional resonant controller-based current loop, forms the VSG control strategy for the grid-connected inverter of energy storage system. The dynamic small signal model of VSG applied to the grid-connected inverter is established to analyze the mechanism of its participation in the demand response of power grid. The dynamic models of VSG participating in voltage regulation and frequency regulation demand responses are deduced, which provide the basis for studying the reactive/active output characteristics of VSG under voltage/frequency fluctuations. Then, the method of setting the key parameters of VSG is summarized under the conditions of maintaining the stability of active power loop and reactive power loop and the dynamic performances of voltage regulation and frequency regulation. Finally, simulative and experimental results verify the validity of the dynamic models of VSG participating in voltage regulation and frequency regulation and the effectiveness of the parameter setting method.

Key words: virtual synchronous generator; energy storage system; grid-connected inverters; droop characteristic; dynamic small signal model; voltage regulation and frequency regulation; parameter setting; model buildings

(上接第 12 页 continued from page 12)

作者简介:

王 鹤(1983—),男,辽宁铁岭人,副教授,博士,研究方向为微电网仿真与控制(E-mail:794525714@qq.com);

朱 琳(1992—),女,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电系统(E-mail:972262720@qq.com);

单凤军(1990—),男,江苏苏州人,助理工程师,硕士,主



王 鹤

要研究方向为柔性直流输电系统(E-mail:983413172@qq.com)。

Power flow calculation of DC power grid with multi-port DC power flow controller

WANG He¹, ZHU Lin¹, SHAN Fengjun², BIAN Jing¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China;

2. Suzhou-branch of Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: Based on the principle of MDCPFC (Multi-port DC Power Flow Controller) with modular multilevel converter, a power flow calculation method of DC power grid considering MDCPFC is proposed. The MDCPFC is modeled by the modified nodal injection power at the end of the installation branch, which simplifies the calculation and improves the operation efficiency. Zhoushan five-port flexible HVDC (High Voltage Direct Current) project is employed as an example, and the control effects of MDCPFC are verified by the comparison of power flow calculation results among MDCPFC, PSAT software and two DC power flow controllers.

Key words: DC power grid; modular multilevel converter; multi-port DC power flow controller; power flow calculation

附录

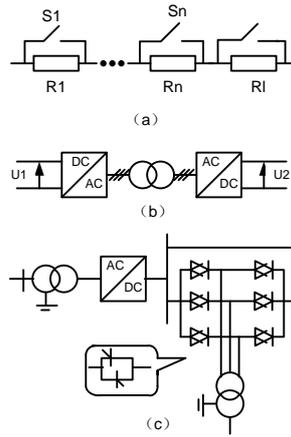


图 1 3 种普通 DCPFC 原理
Fig.1 Principle of three types of common DCPFC

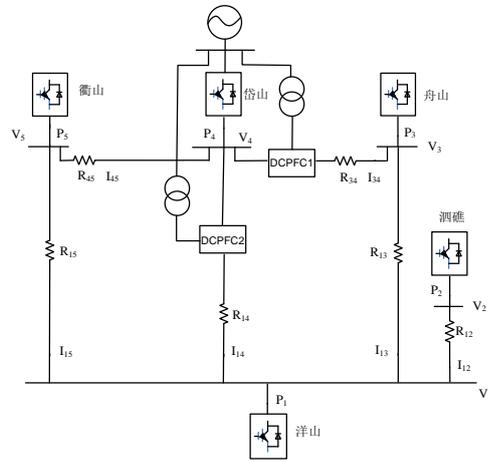


图 A2 舟山五端系统中加装 2 个 DCPFC
Fig.A2 Zhoushan 5-terminal system with two DCPFCs

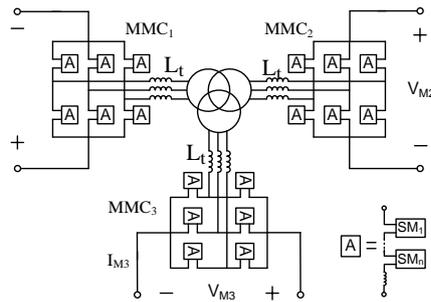


图 A3 MDCPFC 的拓扑结构
Fig.A3 Topology of MDCPFC

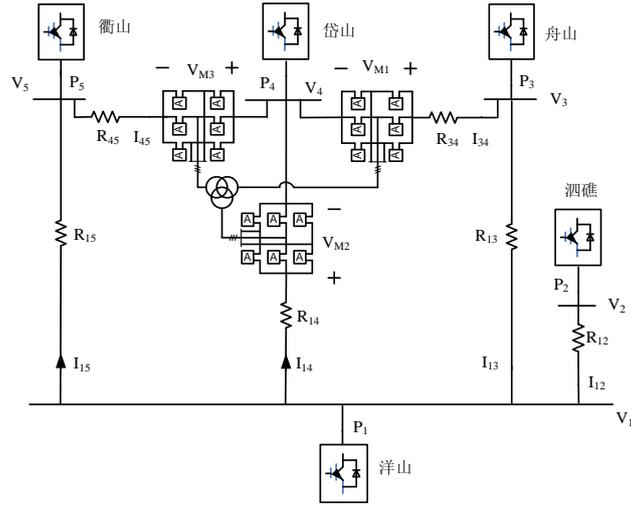


图 A4 舟山柔性直流输电系统示意图

Fig.A4 Schematic diagram of Zhoushan HVDC system

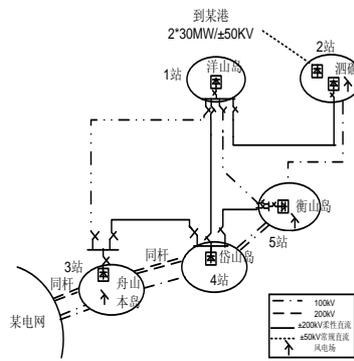


图 A5 舟山五端直流电网图

Fig.A5 Zhoushan five-terminal DC grid

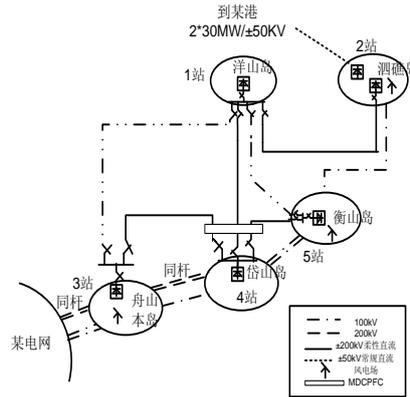


图 A6 加装 1 个 MDCPFC 的舟山五端直流电网图

Fig.A6 Zhoushan five-terminal DC grid with installation of a MDCPFC

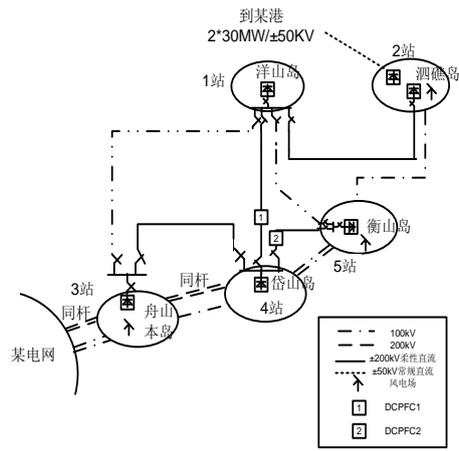


图 A7 加装 2 个 DCPFC 的直流电网图

Fig.A7 Zhoushan five-terminal DC grid with installation of two DCPFCs