

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211133

真双极直流配电网有功-电压分布式二级控制策略

陶 顺, 马喜欢, 管尚书, 王宇丹

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 采用下垂控制的真双极直流配电网存在负荷分配不合理以及正负极电压不平衡问题, 导致换流器利用率降低、额外损耗增加, 并且影响系统稳定性。为了实现负荷合理分配以及抑制正负极电压不平衡, 提出了一种真双极直流配电网有功-电压分布式二级控制策略。该策略按照第二级控制功能将电压源换流器(VSC)分类, 交换相邻VSC间的信息。在此基础上, 逐步迭代得到相应的功率和电压收敛值, 并计算得到电压调节量。由此进一步改变下垂控制参考电压值, 从而实现负荷的合理分配以及抑制电压不平衡。最后, 在PSCAD/EMTDC中搭建了真双极直流配电网模型, 仿真结果验证了该策略的有效性和可靠性。

关键词: 下垂控制; 真双极; 直流配电网; 负荷分配不合理; 电压不平衡; 分布式二级控制

Distributed secondary power and voltage control strategy for a true bipolar DC distribution network

TAO Shun, MA Xihuan, GUAN Shangshu, WANG Yudan

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: A true bipolar DC distribution network with droop control has problems with unreasonable load distribution and unbalanced positive and negative voltages. This will result in reduced converter utilization, increased additional losses, and affect system stability. In order to achieve reasonable load distribution and suppress the imbalance of positive and negative voltages, this paper proposes a distributed secondary power and voltage control strategy for a true bipolar DC distribution network. This strategy classifies voltage source converters (VSCs) according to the secondary control function, and exchanges information between adjacent VSCs. It iteratively obtains the corresponding power and voltage convergence values, and calculates the voltage regulation. This further changes the droop control reference voltage value, so as to achieve reasonable load distribution and suppress voltage imbalance. Finally, a true bipolar DC distribution network model is built in PSCAD/EMTDC, and the simulation results verify the effectiveness and reliability of the strategy.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51777066).

Key words: droop control; true bipolar; DC distribution network; unreasonable load distribution; unbalanced voltage; distributed secondary control

0 引言

电力电子器件的发展和分布式电源的大量接入, 促进了直流配电网的发展^[1]。相比于交流电网, 直流电网具有成本低、损耗小以及电能质量相对较高的优势^[2]。直流配电网拓扑结构很多, 相比于其他结构而言, 真双极直流配电网具有可供接入电压等级较多、安全可靠更高的优点, 因此很多直流

配电网选择此结构。但是当其采用下垂控制时^[3]也存在和其他直流配电网共有的负荷分配不合理问题^[4]以及特有的正负极电压不平衡问题^[5]。

针对采用下垂控制时由于换流器出口侧线缆阻抗差异导致的负荷分配不合理问题, 二次补偿控制和自适应下垂控制方法被相应提出。文献[8-9]提出对下垂曲线纵截距采用平均电压、电流双补偿的二次补偿控制方法; 文献[10-14]将下垂系数定义为关于实际输出有功功率与中央控制器参考输出有功功率差值的函数, 提出下垂系数自适应改变的方法实

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51777066)

现负荷合理分配的目标。文献[15]提出一种基于储能电池 SOC 幂指数的下垂控制, 实现负荷的快速合理分配。上述方法虽然实现了负荷合理分配, 但对通信要求高, 会降低系统可靠性。为了减小对通信的依赖, 一些控制算法也被应用于自适应下垂控制中。文献[16-17]提出一种基于离散一致性算法的自适应下垂控制策略, 利用稀疏通信实现负荷均分, 但是其针对的是多换流器组成的多端单极直流配电网。

双极性直流配电网由于正负极所接负荷、分布式电源以及线路阻抗不平衡还存在特有的正负极电压不平衡问题^[18]。正负极电压不平衡将会导致额外损耗增加, 电能质量下降, 严重时会导致系统不稳定^[19-20]。文献[21]引入具有抑制电压不平衡能力的新型三电平 AC/DC 变化器。文献[22-23]在 AC/DC 变流器出口安装电压平衡器来抑制电压不平衡, 但电压平衡器平衡能力有限而且会增加成本。另外对 DC/DC 变换器采用改进功率平衡控制策略, 利用分布式电源或者储能系统平衡正负极母线间的负荷从而抑制正负极电压不平衡^[24-25]。除此之外, 文献[26]提出基于负荷供电极性切换的直流不平衡电压抑制策略, 通过切换负荷开关, 实现上下游节点不平衡电流的抵消, 进而抑制电压不平衡。由此可见目前双极性配电网正负极电压不平衡的抑制未曾考虑真双极直流配电网中正负极 VSC 的参与和充分利用。

针对真双极直流配电网的负荷分配不合理和正负极电压不平衡问题, 本文提出一种真双极直流配电网有功-电压分布式二级控制策略。该策略将 VSC 按照二级控制目标分为两类, 利用相邻 VSC 的功率、电压信息并采用一致性算法迭代至收敛值, 然后将输出功率、电压与之比较, 得到的差值通过 PI 调节器形成电压调节量之后叠加至初级下垂控制参考电压, 从而实现双重目标。最后在 PSCAD/EMTDC 搭建了真双极直流配电网模型, 仿真结果验证了该策略的有效性和可靠性。

1 真双极直流配电网结构及建模分析

1.1 真双极直流配电网结构

真双极直流配电网结构众多, 常见的为两端真双极直流配电网, 其结构图如图 1 所示。该直流配电网通过 VSC 换流器、变压器与交流电网相连。直流配电网的组成包括 DC/DC 变换器、采用最大功率点追踪模式(MPPT)工作的光伏发电单元、可以切换充放电模式的储能单元以及直流负荷单元。

1.2 负荷分配不合理分析

真双极直流配电网中的 VSC 常常采用下垂控制作为初级控制, 控制框图如图 2 所示。

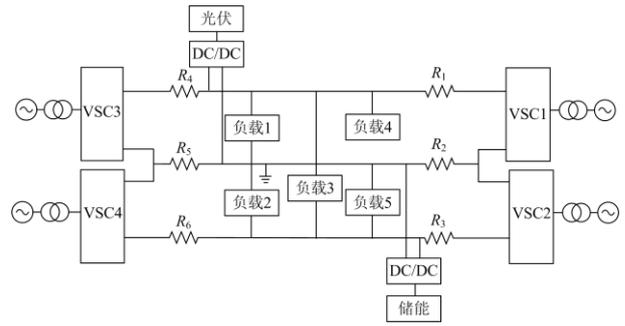


图 1 两端真双极直流配电网结构图

Fig. 1 Structure diagram of two-terminal true bipolar DC distribution network

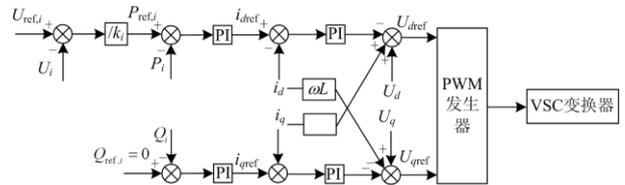


图 2 初级控制框图

Fig. 2 Primary control block diagram

图 2 中: $U_{ref,i}$ 为第 i 个 VSC 的参考电压值; U_i 为第 i 个 VSC 出口实际电压值; k_i 是下垂系数; $P_{ref,i}$ 、 $Q_{ref,i}$ 为 VSC 参考输出有功、无功功率; P_i 、 Q_i 为 VSC 交流侧实际输出有功、无功功率; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为交流侧 d 、 q 轴电流参考值; U_{dref} 、 U_{qref} 分别为交流侧 d 、 q 轴电压参考值; i_d 、 i_q 为交流侧 d 、 q 轴实际电流, U_d 、 U_q 为交流侧 d 、 q 轴实际电压, 分别由交流侧三相电流、电压通过派克变换得到。

其中下垂控制为

$$U_i = U_{ref,i} - k_i P_i \quad (1)$$

VSC 采用下垂控制时, 由于出口线缆阻抗差异导致负荷分配不合理。图 3 为两个 VSC 并联运行时的等效电路图, 图中 P_1 、 P_3 分别是两换流器输出功率, R_1 、 R_3 是两换流器出口侧线缆电阻, U_{dc} 是母线电压, R_{load} 是母线上负荷。两个换流器下垂系数按照额定容量设定, 如式(2)。

$$k_1 P_{rate1} = k_3 P_{rate3} \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_3 分别为两换流器下垂控制系数; P_{rate1} 、 P_{rate3} 分别为 VSC1、VSC3 的额定容量。

根据图 3 可得

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_1(U_1 - U_{dc})}{R_1} \\ P_3 = \frac{U_3(U_3 - U_{dc})}{R_3} \end{cases} \quad (3)$$

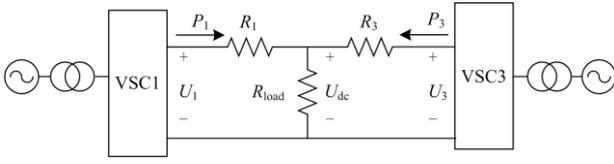


图3 两个 VSC 并联运行等效电路

Fig. 3 Two VSC parallel operation equivalent circuit

将式(1)代入式(3)得到换流器输出功率为

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_1(U_{ref1} - U_{dc})}{R_1 + k_1 U_1} \\ P_3 = \frac{U_3(U_{ref3} - U_{dc})}{R_3 + k_3 U_3} \end{cases} \quad (4)$$

当两个换流器参考电压相同时, 输出功率比值为

$$\frac{P_1}{P_3} = \frac{U_1(R_3 + k_3 U_3)}{U_3(R_1 + k_1 U_1)} \quad (5)$$

当忽略线路电阻时, 由式(5)可知负荷功率可实现按照容量进行分配。

$$\frac{P_1}{P_3} = \frac{k_3}{k_1} = \frac{P_{rate1}}{P_{rate3}} \quad (6)$$

然而受实际线缆电阻的差异影响, 负荷无法在换流器中按照容量进行分配。

1.3 正负极电压不平衡分析

双极性配电网由于正负极所接负载、换流器下垂控制参数以及线缆阻抗不平衡将会导致正负极电压不平衡。电压不平衡会导致额外损耗增加, 影响系统稳定, 因此需要对电压不平衡进行抑制。电压不平衡度作为评估指标, 定义为式(7), 其值应不超过 3%^[18]。

$$VUF\% = \frac{|U_p - U_n|}{(U_p + U_n)/2} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $VUF\%$ 为电压不平衡度; U_p 、 U_n 分别为正负极母线电压。

VSC 串联运行等效电路图如图 4 所示, 其中 P_1 、 P_2 分别是两换流器输出功率, R_1 、 R_2 分别是两换流器出口侧线缆电阻, U_1 、 U_2 分别是两换流器出口电压, R_p 、 R_n 分别是接在正、负极母线上的负荷, 此处研究的是恒电阻负荷, 恒功率负荷分析类似。

该电路满足下列方程:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_1^2}{R_1 + R_p} \\ P_2 = \frac{U_2^2}{R_2 + R_n} \end{cases} \quad (8)$$

当忽略换流器损耗时, 换流器交直流两侧有功保

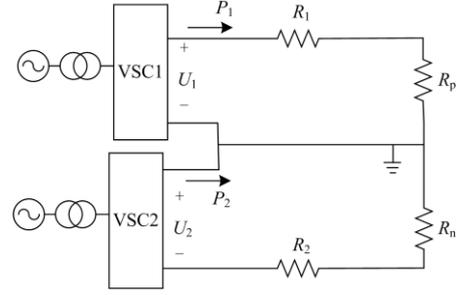


图4 VSC 串联运行等效电路图

Fig. 4 VSC series operation equivalent circuit diagram

持平衡, 将式(1)代入式(8)得到换流器输出电压为

$$\begin{cases} U_1 = \frac{-R'_1 + \sqrt{R_1'^2 + 4k_1 U_{ref1} - R'_1}}{2k_1} \\ U_2 = \frac{-R'_2 + \sqrt{R_2'^2 + 4k_2 U_{ref2} - R'_2}}{2k_2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $R'_1 = R_1 + R_p$; $R'_2 = R_2 + R_n$ 。由此可以看出: 正负极电压相等时, 需要两换流器电压参考值、下垂系数、换流器出口侧电阻、正负极所接负荷满足上述条件。实际参数很难满足上述条件, 故正负极电压不平衡问题较为容易出现。

2 真双极直流配电网有功-电压分布式二级控制策略

本文提出的真双极直流配电网的控制策略由初级下垂控制和有功-电压分布式二级控制两个部分组成。其中初级下垂控制对负荷进行初次分配, 使电压达到稳定, 分布式二级控制目标为将负荷按照容量进行分配的同时抑制正负极电压不平衡。二级控制策略如图 5 所示, 配电网中相邻节点进行信息交换, 然后采用一致性算法得到相应的功率、电压收敛值, 最终与各自的输出功率、端口电压相比, 差值利用 PI 调节得到初级参考电压值的调节量。

2.1 一致性算法

相对于集中控制而言, 分布式控制具有稳定性好、通信压力小、扩展性好的优点。而基于一致性算法的分布式控制方法仅需要本地节点与相邻节点进行信息互换, 对信息进行迭代便可使得各个节点状态变量收敛到平均值, 有利于协调真双极直流配电网各换流器共同完成控制目标。 x_i 为节点 i 的某一个状态变量, 可以为输出功率也可以为母线电压。一阶分布式一致性算法表达式为

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j[k], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

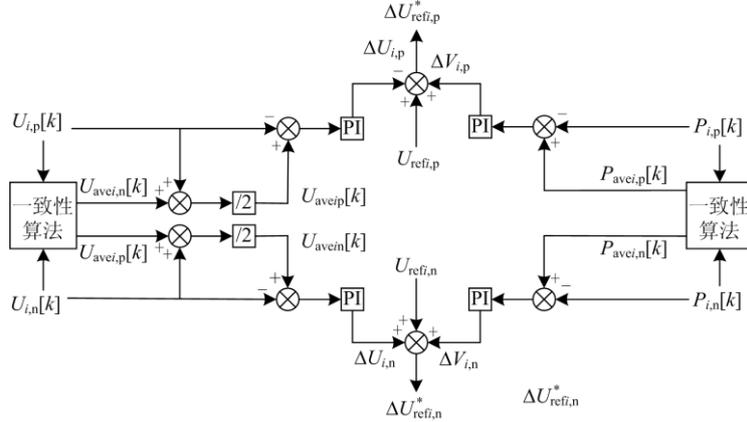


图 5 二级控制框图

Fig. 5 Secondary control block diagram

矩阵形式为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{W}\mathbf{X}(k) \quad (11)$$

式中: k 为迭代次数; j 为与节点 i 相邻的其他节点; n 为节点的总数; w_{ij} 为状态转移矩阵的第 i 行 j 列的元素, 其值由网络拓扑决定, 当两节点不相邻时 w_{ij} 值为 0。本文选取 MA (Metropolis Algorithm) 计算方法^[27], 构造如式 (12) 所示。

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{1+d}, & i \neq j \\ 1 - \sum_{j=1}^N \frac{1}{1+d}, & i = j \end{cases} \quad (12)$$

式中: d 为节点 i 、节点 j 的邻节点个数中的最大值; N 为 i 节点的相邻节点个数。

当前后时刻数值之差的绝对值小于收敛精度时达到收敛, 即

$$|x_i[k+1] - x_i[k]| < \varepsilon \quad (13)$$

式中, ε 为收敛精度。

2.2 分布式二级控制策略

基于上述一致性算法, 本文提出的分布式二级控制步骤如下所述。

(1) 将真双极直流配电网中形成正负极的两 VSC 设为一个总节点 i , 正负极的两个换流器是该节点下的分节点, 下标 m 为 p 、 n 时分别表示正、负极。不同节点之间的正、负极换流器分别参与接在正、负极母线上的负荷分配调节, 同一节点的正负极换流器参与该节点的电压不平衡调节。

(2) 在二级控制策略启动前, 系统的负荷、电压根据初级下垂控制进行自主分配、调节。启动二级控制, 此时设为 k 时刻, 各个换流器采集自身输出功率 $P_{i,p}[k]$ 、 $P_{i,n}[k]$ 和端口电压信息 $U_{i,p}[k]$ 、 $U_{i,n}[k]$ 。然后将 $P_{i,p}[k]$ 、 $P_{i,n}[k]$ 、 $U_{i,p}[k]$ 、 $U_{i,n}[k]$ 发送给相邻节点

对应的正负极。

(3) 各个换流器得到相邻节点的对应信息之后, 进行一致性迭代, 得到对应平均值 $P_{avei,p}[k]$ 、 $P_{avei,n}[k]$ 、 $U_{avei,p}[k]$ 和 $U_{avei,n}[k]$, 计算如下:

$$\begin{cases} P_{avei,m}[k] = \sum_{j=1}^n w_{ij,Pm} P_{i,m}[k] \\ U_{avei,m}[k] = \sum_{j=1}^n w_{ij,U_m} U_{i,m}[k] \end{cases} \quad i=1, \dots, n; m=p, n \quad (14)$$

对于抑制电压不平衡而言, 还需要进行计算电压平均值:

$$\begin{cases} U_{aveip}[k] = \frac{U_{i,p}[k] + U_{avei,n}[k]}{2} \\ U_{avein}[k] = \frac{U_{i,n}[k] + U_{avei,p}[k]}{2} \end{cases} \quad (15)$$

(4) 将得到的功率平均值 $P_{avei,p}[k]$ 、 $P_{avei,n}[k]$ 和电压平均值 $U_{aveip}[k]$ 、 $U_{avein}[k]$ 利用式 (13) 进行收敛判断。若收敛, 则将功率平均值、电压平均值与其对应的输出功率、电压进行比较, 比较的结果利用 PI 调节器得到电压补偿量 ΔU_i 和 ΔV_i , 如式 (16), 然后叠加到初级控制中改变初级控制的参考电压值; 若不收敛则各个换流站之间继续进行信息交换, 重复进行步骤 (3) 直至收敛。

$$\begin{cases} \Delta U_{i,m} = (k_{p,p} + \frac{k_{Lp}}{s})(P_{avei,m}[k] - P_{i,m}[k]) \\ \Delta V_{i,m} = (k_{p,u} + \frac{k_{Lu}}{s})(U_{avei,m}[k] - U_{i,m}[k]) \end{cases} \quad m=p, n \quad (16)$$

式中, $k_{p,p}$ 、 k_{Lp} 、 $k_{p,u}$ 、 k_{Lu} 分别为二级控制中功率、电压控制的 PI 参数。此时 i 节点正负极换流器的初级控制参考电压值变为

$$U_{refi,m}^* = U_{refi,m} + \Delta U_{i,m} + \Delta V_{i,m}, \quad m=p, n \quad (17)$$

3 仿真分析

为了验证所提二级控制策略的有效性, 本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建如图 1 所示的两端真双极直流配电网模型。

直流配电网额定电压为 0.8 kV, 光伏发电单元额定功率为 200 kW, 储能单元额定容量为 25 Ah, 一共 120 节储能电池串联, 初始 SOC 为 0.4。五个直流负载分别为 800 kW、200 kW、200 kW、100 kW 和 150 kW。各个换流站的额定功率均为 800 kW。仿真模型参数和控制参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数和控制参数

Table 1 Parameters of simulation model and control

参数	取值	参数	取值
变压器变比/kV	10/0.4	$k_{p,p}$	5
R_1-R_3/Ω	0.05	$k_{l,p}$	20
R_4-R_6/Ω	0.04	$k_{p,u}$	0.8
k	0.088	$k_{l,u}$	10

将图 1 中 4 个 VSC 按照控制目标进行分类, VSC1、VSC2 形成的真双极作为总节点 1, VSC1 和 VSC2 作为其下的正负极分节点, 其输出功率和电压分别为 $P_{1,p}$ 、 $P_{1,n}$ 、 $U_{1,p}$ 、 $U_{1,n}$, 电压不平衡度为 $VUF_1\%$ 。VSC3、VSC4 类似。

将节点进行分类之后, 根据式(12)得到该配电网的状态转移矩阵为

$$W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

本文收敛精度 ε 为 0.01。

3.1 有效性分析

基于图 1 所示的电路, 设 1 s 之前负荷 1~3 接入电网, 负荷 4~5 断开, 正极母线总负荷为 900 kW, 负极母线总负荷为 300 kW, 电网向储能充电, 充电功率为 100 kW。光伏光照强度为 600 W/m², 输出功率为 80 kW。此时各换流站根据下垂控制自动分配负荷功率, 所分配的功率不满足容量之比, 且出现了电压不平衡现象, 如图 6、图 7 所示。1 s 时采用本文所提的有功-电压二级控制策略, VSC1 与 VSC3、VSC2 与 VSC4 输出功率之比稳定维持在 1:1, 电压不平衡得到抑制, 如图 8、图 9 所示。正负极电压不平衡度在二级控制启动前后对比如表 2 所示。

1.5 s 时电网向储能充电结束, 2 s 时负荷 4~5 投入运行, 2.5 s 时光伏光照强度由 600 W/m² 变化至 1 200 W/m², 输出功率由 80 kW 变为 160 kW, 3.5 s 时将连接在 VSC2 与 VSC4 母线上的所有负荷包括负荷 2、负荷 3 和负荷 5 全部切除。从图 8 可

以看出, 当负荷切除之后, VSC2 与 VSC4 的输出功率降为 0, VSC1 与 VSC3 由于负荷 3 的切除, 输出功率下降但分配之比仍按照容量进行分配。从表 2 可以看出, 负荷切除后, 正负极电压不平衡度 $VUF_1\%$ 、 $VUF_2\%$ 分别是 3.46%、4.11%, 已经超过 3%, 投入二级控制之后, $VUF_1\%$ 、 $VUF_2\%$ 分别下降到 1.27%、2.37%。

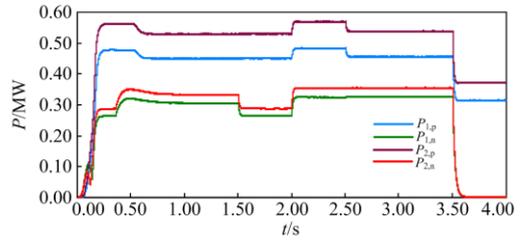


图 6 各 VSC 输出功率(不施加二级控制)

Fig. 6 Output power of each VSC (no secondary control applied)

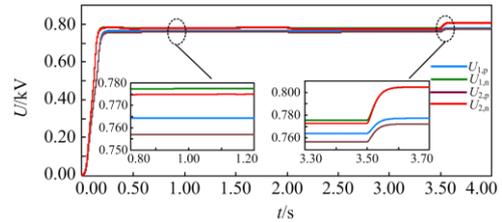


图 7 各 VSC 端口电压(不施加二级控制)

Fig. 7 Voltage of each VSC port (no secondary control applied)

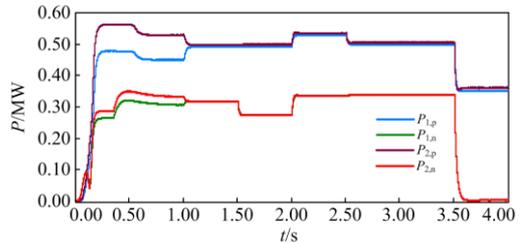


图 8 各 VSC 输出功率(1 s 施加二级控制)

Fig. 8 Output power of each VSC (secondary control applied for 1 s)

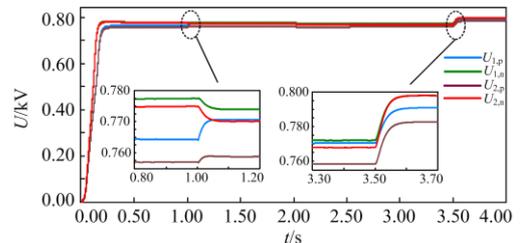


图 9 各 VSC 端口电压(1 s 施加二级控制)

Fig. 9 Voltage of each VSC port (secondary control applied for 1 s)

表 2 正负极电压不平衡度

二级控制	时间/s	0~1.0	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3.5	3.5~4.0
施加	VUF ₁ %	1.70	0.42	0.63	0.42	0.22	1.27
	VUF ₂ %	2.34	1.48	1.76	1.57	1.26	2.37
不施加	VUF ₁ %	1.70	1.70	2.19	1.86	1.50	3.46
	VUF ₂ %	2.34	2.34	2.87	2.55	2.13	4.11

以上各种情况下各换流站投入二级控制之后均能快速响应,使得负荷在对应 VSC 中按容量分配且正负极电压不平衡得到抑制。

3.2 适应性以及可靠性分析

为了验证本文所提方法的适应性和可靠性,在图 1 的基础上构造如图 10 所示的三端真双极直流配电网,该配电网与图 1 相比增添了一个由 VSC5 和 VSC6 组成的新真双极端口,且出口侧电阻 R_7 — R_9 为 0.05Ω 。

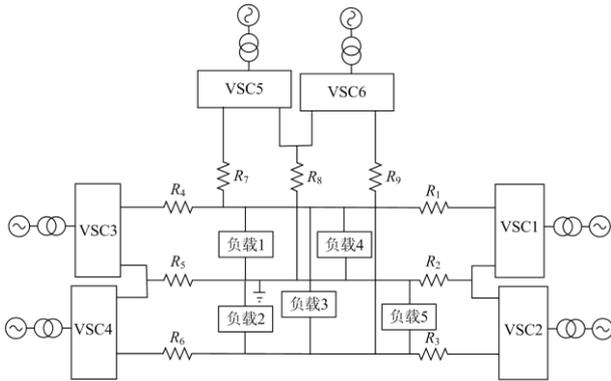


图 10 三端真双极直流配电网

Fig. 10 Three-terminal true bipolar DC distribution network

VSC5 和 VSC6 作为节点 3,此时配电网状态转移矩阵为

$$W = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

0.5 s 之前负荷 1~3 接入电网,负荷 4~5 断开,0.5 s 时投入二级控制,1 s 时负荷 4~5 投入运行。此时各换流站输出功率如图 11 所示,电压不平衡度如表 3 所示。由图 11 可以看出,负荷在对应 VSC 上合理分配。由表 3 可以看出,二级控制投入之后电压不平衡度有所下降。则该控制策略不仅适用于两端真双极直流配电网,也适用于多端真双极直流配电网。

1.5 s 时节点 1 下的 VSC1 与 VSC2 退出运行,

此时 VSC3~6 的状态转移矩阵同式(18)。从图 11 可以看出,VSC1 与 VSC2 退出运行后,输出功率 $P_{1,p}$ 、 $P_{1,n}$ 变为 0,VSC3 和 VSC5 额外承担原有的 VSC1 功率输出,VSC4 与 VSC6 额外承担原有的 VSC2 功率输出,输出功率分配没有发生变化仍为 1:1。从表 3 可以看出,二级控制投入后电压不平衡度有所下降。综上,本文所提二级控制策略即使在最极端的情况下依旧可以保证可靠性。

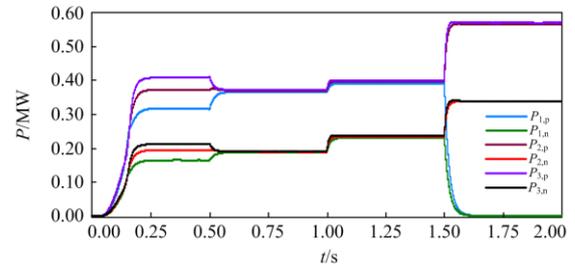


图 11 各 VSC 输出功率

Fig. 11 Output power of each VSC

表 3 正负极电压不平衡度

二级控制	时间/s	0~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2
施加	VUF ₁ %	1.78	0.64	0.54	—
	VUF ₂ %	2.11	1.19	1.04	1.23
	VUF ₃ %	2.33	1.48	1.31	1.62
不施加	VUF ₁ %	1.78	1.78	1.60	—
	VUF ₂ %	2.11	2.11	1.90	2.58
	VUF ₃ %	2.33	2.33	2.09	2.84

3.3 通信延迟影响分析

本文所提的二级控制策略通过交换相邻节点信息进行迭代,所需要的信息通过通信获得。上述研究是在不考虑通信延迟条件下进行的,然而通信延迟是不可避免的。为了分析通信延迟对所提控制策略的影响,在 3.1 节案例的基础上添加 20 ms 的延迟^[16],与不加通信延迟的仿真结果对比分别如图 12、图 13 所示。2 s 时负荷 4、5 投入运行,从图中可以看出,由于存在通信延迟,换流器输出功率和端口电压有所波动且达到稳定的时间变长,但是达到稳定之后负荷在相应换流器中仍按容量进行分配,电压不平衡也得到抑制。仿真结果说明通信延迟改变了控制的收敛速度,但不改变策略的有效性。延迟的存在使得系统的输出发生波动,当通信延迟过大时会影响系统的稳定性,因此在应用中应尽可能减少通信延迟。

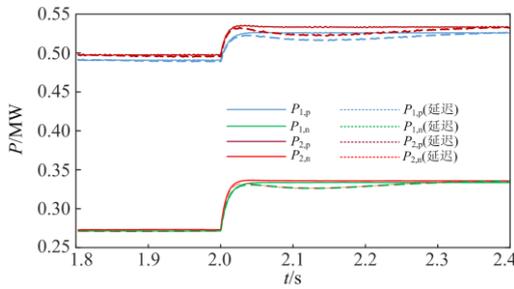


图 12 各 VSC 输出功率

Fig. 12 Output power of each VSC port

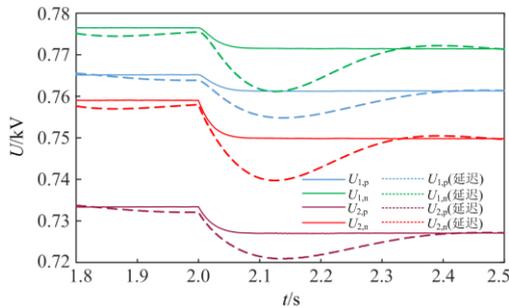


图 13 各 VSC 输出电压

Fig. 13 Voltage of each VSC port

4 结论

针对采用下垂控制的真双极直流配电网存在负荷无法合理分配以及正负极电压不平衡的问题, 本文提出一种真双极直流配电网二级有功-电压分布式控制策略。该策略包含功率调整和电压调整两部分, 基于稀疏通信获取相邻节点信息之后采用一致性算法得到功率和电压的收敛值, 通过计算得到与功率调整和电压调整相关联的电压调节量, 并将其叠加至初级下垂控制参考电压上, 从而实现功率合理分配和抑制电压不平衡的双重目标。最后在所搭建的真双极配电网模型上验证了该策略在有无通信延时下的有效性和可靠性。

参考文献

[1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19, 5.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19, 5.

[2] 吴磊. 直流配电网电压控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
WU Lei. Research on DC distribution network voltage control strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[3] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制

策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 115-121.

DONG Jijun, CHEN Hao, ZHOU Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.

[4] DRAGIČEVIĆ T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(2): 695-706.

[5] GU Y, LI W, HE X. Analysis and control of bipolar LVDC grid with DC symmetrical component method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(1): 685-694.

[6] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.

[7] 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, 7119.
LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Definition and correlation analysis of power quality index of DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6847-6860, 7119.

[8] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(4): 1800-1812.

[9] WANG P, LU X, YANG X, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658-6673.

[10] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.

[11] TAH A, DAS D. An enhanced droop control method for accurate load sharing and voltage improvement of isolated and interconnected DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1194-1204.

[12] 王二永, 王帅. 自适应下垂系数的低压微电网功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 52-56.
WANG Eryong, WANG Shuai. Power control strategy of low voltage microgrid based on adaptive droop coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 52-56.

[13] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略

- [J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.
- LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.
- [14] 喻思, 米阳, 马宇辰, 等. 自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网功率分配控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18):19-26.
- YU Si, MI Yang, MA Yuchen, et al. Power distribution control of an island DC microgrid based on adaptive high-pass filter droop control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 19-26.
- [15] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.
- ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [16] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4397-4407.
- LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4397-4407.
- [17] 周敏, 吕振宇, 王琦, 等. 直流配电网换流站分布式有功-电压二级优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8002-8011.
- ZHOU Min, LÜ Zhenyu, WANG Qi, et al. Distributed active power-voltage two-level optimization control strategy for converter station of DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8002-8011.
- [18] JUNG T H, GWON G, KIM C H, et al. Voltage regulation method for voltage drop compensation and unbalance reduction in bipolar low-voltage DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(1): 141-149.
- [19] CHEN H C, CHENG P T. A DC bus voltage balancing technique for the cascaded H-bridge STATCOM with improved reliability under grid faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 1263-1270.
- [20] 江晨, 曾国宏, 吴学智, 等. 双极性直流微网的分层控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2217-2222.
- JIANG Chen, ZENG Guohong, WU Xuezhi, et al. Hierarchical control strategy of bipolar DC microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2217-2222.
- [21] KIM S, KIM H G, CHA H. A new voltage balancer with DC-DC converter function[C] // 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), October 30-November 2, 2018, Singapore, Singapore.
- [22] 汪飞, 雷志方, 徐新蔚. 面向直流微电网的电压平衡器拓扑结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1604-1612.
- WANG Fei, LEI Zhifang, XU Xinwei. Research on topologies of voltage balancers applied in DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1604-1612.
- [23] 李霞林, 张雪松, 郭力, 等. 双极性直流微电网中多电压平衡器协调控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 721-729.
- LI Xialin, ZHANG Xuesong, GUO Li, et al. Coordinated control of multi-voltage balancer in bipolar DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 721-729.
- [24] ZHANG Z, SHI D, JIN C, et al. Droop control of a bipolar DC microgrid for load sharing and voltage balancing[C] // 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), June 3-7, 2017, Taiwan, China.
- [25] ZHANG C, JIAO M, LIANG M, et al. Power control of distributed energy storage system in bipolar DC microgrid[C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), August 11-14, 2019, Harbin, China.
- [26] 廖建权, 周念成, 王强钢. 辐射型双极直流配电网不平衡电压分析及抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5380-5388, 5585.
- LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang. Analysis and suppression of unbalanced voltage in radiant bipolar DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5380-5388, 5585.
- [27] YING X, CHOW M Y. Sampling rate selection influences on incremental cost consensus algorithm in decentralized economic dispatch[C] // 38th Annual Conference on Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada: 1410-1415.

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2021-10-29

作者简介:

陶 顺(1972—), 女, 副教授, 研究方向为智能配电网与电能质量; E-mail: tao_shun@126.com

马喜欢(1996—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为双极性直流配电网电压-有功控制; E-mail: mxh1521996@163.com

管尚书(1997—), 男, 硕士, 研究方向为直流配电网运行控制。E-mail: 18910852457@163.com

(编辑 魏小丽)