

# 基于前端电流平衡器概念的分布式 直流系统极间均衡策略

李 琼<sup>1</sup>, 朱 淼<sup>1</sup>, 李修一<sup>1</sup>, 何国庆<sup>2</sup>, 蔡 旭<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;  
2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 针对含高比例分布式电源的双极性直流配电系统所面临的极间均衡控制与电能质量问题, 本文提出一种基于前端电流平衡器的解决方案。该方案通过在每一用户所对应的公共连接点处配备电流平衡电路, 实现配电网内任意用户节点的正/负极电流均衡控制, 进而实现全网正负极对称运行。在此基础上本文提出一种适用于双极性低压直流配电网的前端电流平衡器拓扑及其控制策略, 并给出基于 P/N 型 Boost 电路的分布式发电单元并网架构, 形成具体的分布式直流电源双极性接入技术方案。该方案一方面可实现分布式电源与直流型负载的高效率、灵活化接入; 另一方面可以保证任意用户与配电网正/负极线路间交换电流相等, 保证可再生能源高渗透率接入条件下直流双极间均衡运行。针对正/负极侧分布式电源功率失衡典型工况, 仿真结果表明理论分析正确可靠。该方案在未来分布式直流配电系统中具备潜在应用价值。

**关键词:** 双极性直流配电系统; 极间均衡控制; 前端电流平衡器; 分布式发电; P/N 型 Boost 变换器

**DOI:** 10.12067/ATEEE1712047      **文章编号:** 1003-3076(2018)05-0037-08      **中图分类号:** TM6

## 1 引言

相较于传统交流配电网, 直流配电系统具有若干技术特点, 包括: ①适应潜在直流负载, 减少中间转换环节, 增效节能; ②相同电压水平(线路耐压)下传输容量大, 覆盖范围广; ③无集肤效应, 线损小; ④不涉及无功功率与频率问题, 系统分析、控制简明清晰; ⑤具有良好稳定性, 无相位同步问题, 适应分布式可再生能源高渗透率接入。因此, 中/低压直流配电网作为未来电力系统的重要形态, 已得到学术界与工业界的广泛关注, 并在数据中心、通信机房等场合获得成功应用<sup>[1,2]</sup>。

直流配电网电压等级序列目前尚无公认标准, 依照对地电压关系不同, 可分为单极性与双极性两种制式。其中双极性直流配电具备以下优点: ①用户侧可选供电电压等级多; ②可单极运行, 供电可靠性高; ③相同容量下, 线路对地电压低, 绝缘应力小,

安全性好。可以预见, 双极性直流配电系统作为优势技术方案, 将在未来区域性直流配电网建设中获得广泛应用。

构成双极性中/低压直流配电网的方式可分为两种: ①双电压源型(VSC)换流器直流侧串联输出, 中点接地的“真双极”结构; ②单 VSC 换流器直流侧中点接地的“伪双极”结构(也称对称单极结构)。其中方式②因具有硬件成本低、运行控制方法简明等特点, 广泛适用于低压直流配电网、直流微网的构建, 其基本架构如图 1 所示<sup>[3,4]</sup>。低压直流配电网作为电力系统末梢环节, 直接面对用户负载与分布式电源。当采用图 1(b)的对称单级制式构建低压直流配电系统时, 因正、负两极所带负载不平衡, 将导致两极对地电压不均衡<sup>[5]</sup>, 电能质量降低, 影响系统正常运行, 这时需引入电压平衡器(Voltage Balancer, VB)加以主动控制<sup>[6,7]</sup>。基于电压平衡器的三线制双极性低压直流配电网结构如图 2 所示。

**收稿日期:** 2017-12-19  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51477102)、国家电网公司科技项目(多分布式电源并网运行特性与仿真技术)  
**作者简介:** 李 琼(1992-), 女, 江西籍, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电系统功率控制技术;  
朱 淼(1979-), 男, 江苏籍, 研究员, 博士, 主要研究方向为电力电子变换器与可再生能源发电。

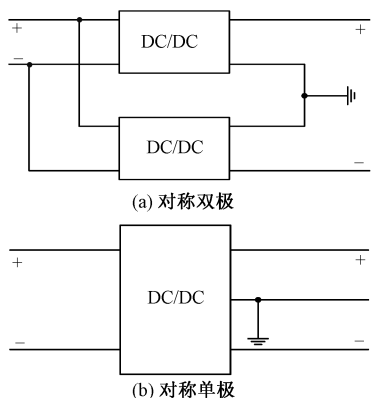


图1 双极性直流配电网架构

Fig. 1 Configurations of bipolar DC distribution system

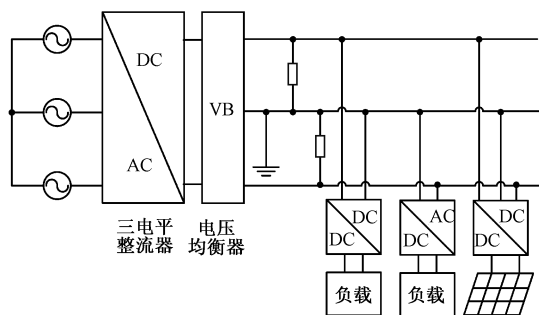


图2 基于电压平衡器的三线制双极性低压直流配电网

Fig. 2 Structure of voltage balancer based three-wire low voltage DC distribution system

本文以分布式可再生能源高渗透率接入条件下的三线制低压直流配电网为基本技术场景,深入探讨系统极间均衡运行控制方法,进而提出在用户节点引入前端电流平衡器(Front-End Current Balancer, FECB),以实现系统正负极间电压、电流、功率良好均衡,提升电能质量的新方案,并进行仿真模拟验证。

## 2 三线制低压直流配电系统的极间均衡

本节将首先分析三线制双极性直流配电网极间不均衡现象的产生原因与表现,进而提出借助前端电流平衡器实现极间均衡运行控制的方法与相关技术概念。

### 2.1 极间均衡条件

图2 直流配电网的等效电路如图3所示。左侧虚线框内电压源代表运行于定直流侧电压模式下的VSC换流站,其对外呈现电压源特性,为整个配电网系统提供电压支撑,输出端电压值为 $2V_{dc}$ ;右侧虚线框内为 $N$ 个用户集群的等效电路,可视为电路割

集,其内部含有独立连接于正、负极两侧的负载与分布式电源,均呈现电流源特性;正极、负极、中性线(接地)线路电阻分别集总等效为电阻 $r_p$ 、 $r_n$ 、 $r_e$ ;各物理量符号及参考极性、方向见图3。

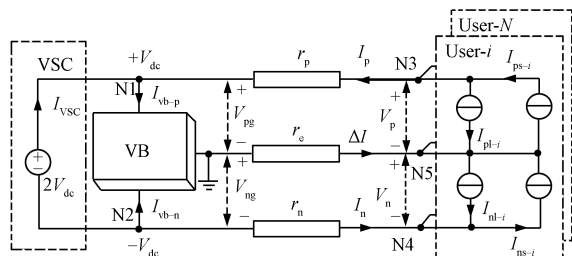


图3 三线制直流配电网等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of three-wire DC distribution system

为便于阐明问题,不失一般性,此处仅分析VSC换流站与共用PCC点(节点N3、N4和N5)的一组用户( $N$ 个)通过独立线路连接的情况。系统运行中电压平衡器维持其出口正、负极间电压相等,即 $V_{pg} = V_{ng} = V_{dc}$ ;用户 $i$ 正、负极侧负载电流分别为 $I_{pl-i}$ 和 $I_{nl-i}$ ,正、负极侧分布式电源电流分别为 $I_{ps-i}$ 和 $I_{ns-i}$ ,则对节点N3、N4由KCL可有:

$$\begin{cases} I_p = \sum_{i=1}^N I_{ps-i} - \sum_{i=1}^N I_{pl-i} \\ I_n = \sum_{i=1}^N I_{ns-i} - \sum_{i=1}^N I_{nl-i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $I_p$ 和 $I_n$ 分别为用户集群与配电网间交换的正、负极电流(设发出电能为正)。对于从节点N3-N4-N5切断的割集,由KCL可知中性线电流 $\Delta I$ 为:

$$\Delta I = I_p - I_n \quad (2)$$

针对电压平衡器两端节点N1和N2,由KCL可有:

$$\begin{cases} I_{vb-p} = I_p + I_{VSC} \\ I_{vb-n} = -I_n - I_{VSC} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $I_{VSC}$ 为换流站输出直流电流(以向直流侧供电为正); $I_{vb-p}$ 和 $I_{vb-n}$ 分别为电压平衡器对正、负极线路的等效转移电流。由式(2)和式(3)联立可得:

$$\Delta I = I_{vb-p} + I_{vb-n} \quad (4)$$

电压平衡器可视为两端口网络,根据电路原理其消耗的总功率 $P_{vb}$ 可表示为任意两端口功率的代数和,考虑电压电流参考的关联性,则有:

$$P_{vb} = P_{vb-p} + P_{vb-n} = I_{vb-p} V_{pg} - I_{vb-n} V_{ng} \quad (5)$$

理想运行状况下 $V_{pg} = V_{ng} = V_{dc}$ ,且电压平衡器内部不含有阻性功率消耗,即 $P_{vb} = 0$ ,再结合式(2)、式(4)、式(5)可得:

$$I_{vb-p} = I_{vb-n} = \frac{1}{2}\Delta I = \frac{1}{2}(I_p - I_n) \quad (6)$$

考虑线路损耗,用户侧正、负极电压  $V_p$  和  $V_n$  分别为:

$$V_p = V_{dc} + I_p r_p + r_e \Delta I \quad (7)$$

$$V_n = V_{dc} + I_n r_n - r_e \Delta I \quad (8)$$

用户侧正负极间电压偏移值  $\Delta V$  与用户侧中性线对地电位偏移值  $V_{neu}$  分别为:

$$\Delta V = V_p - V_n = 2r_e \Delta I + I_p r_p - I_n r_n \quad (9)$$

$$V_{neu} = -r_e \Delta I \quad (10)$$

为了分析负载与分布式电源对直流配电网极间均衡性的影响,可以忽略线路电阻参数的轻微差异,因此本文中假设:

$$r_p = r_n = r_e = r \quad (11)$$

联立式(2)、式(9)~式(11)可得:

$$\Delta V = 3r \Delta I \quad (12)$$

$$V_{neu} = -r \Delta I \quad (13)$$

此时可求得用户集群向配电网正、负极两侧注入的功率差额  $\Delta P$  为:

$$\Delta P = P_p - P_n = V_p I_p - V_n I_n \quad (14)$$

式中,  $P_p$  和  $P_n$  分别为用户集群向正极侧和负极侧注入的功率(发电上网为正)。联立式(2)、式(7)、式(8)、式(11)、式(14)可得:

$$\Delta P = [V_{dc} + 2r(I_p + I_n)] \Delta I \quad (15)$$

综上所述,在存在不平衡负荷与不平衡分布式电源的情况下,仅依靠电压平衡器无法确保双极性直流配电网正负极整体均衡运行,可能出现以下问题:①用户侧正负极电压不相等;②中性线电流不为零,且对地电位出现偏移;③系统各断面下正负极功率不对等。上述问题可能造成:①用户侧电能质量降低,敏感负荷无法正常工作;②增加线路发热损耗;③降低用电安全性;④系统正负极线路、设备容量得不到充分对称的使用,可能引发额外损耗或影响系统正常稳定运行。

## 2.2 “前端电流平衡器”基本概念

随着分布式可再生能源发电技术的普及,未来中/低压直流配电系统将成为接纳分布式电源的主要载体。高渗透率、大容量分布式电源接入将成为直流配电网的技术“新常态”。

分布式电源的出力具有随机性强、波动幅度大的显著特点,其大量接入将极大增加直流配电网正负极间功率失衡的可能性与潜在程度。因此,为确保分布式电源高渗透接入条件下双极性直流配电系

统安全稳定运行,维持系统各处正负极间电压、电流、功率总体均衡,保证电能质量,需要在现有三线制直流配电网的基础上进一步引入新的均衡控制装置及相应控制策略。

由式(2)、式(12)、式(13)、式(15)可知,在换流站侧正负极电压对称、正负极传输线路电阻特性一致的条件下,保持系统正负极间电压、电流、功率处处均衡的充分必要条件是用户侧正负极电流相等。对于图3的系统而言,该条件可具体表示为:

$$\Delta I = I_p - I_n = 0 \quad (16)$$

即

$$\sum_{i=1}^N I_{ps-i} - \sum_{i=1}^N I_{pl-i} = \sum_{i=1}^N I_{ns-i} - \sum_{i=1}^N I_{nl-i} \quad (17)$$

对于某一用户  $i$  可以将其与配电网正极(节点N3)交换的电流记作  $I_{p-i}$ ,将其与配电网负极(节点N4)交换的电流记作  $I_{n-i}$ ,则有:

$$\begin{cases} I_{p-i} = I_{ps-i} - I_{pl-i} \\ I_{n-i} = I_{ns-i} - I_{nl-i} \end{cases} \quad (18)$$

由此,可将系统均衡条件式(17)改写为:

$$\sum_{i=1}^N I_{p-i} = \sum_{i=1}^N I_{n-i} \quad (19)$$

考虑到实际直流配电网的网架拓扑复杂多变,为保证系统极间处处均衡,应当引入更加严格的条件,使得每一用户割集满足正负极电流平衡。即对于任意用户单元  $i$ ,满足:

$$I_{p-i} = I_{n-i} \quad (20)$$

式中,  $I_{p-i}$  和  $I_{n-i}$  分别为该用户节点与直流配电网正、负极侧交换的电流(以向配电网注入电流为正方向)。

为实现这一目标,可在用户侧引入专用极间功率交换装置,实现正负极线路电流转移与二次均衡控制。该装置安装于直流配电网前端用户侧,其核心控制目标为保证用户与配电网连接点处正负极电流相等(中性线电流为零),对配电网呈现电流源特性。从电路分析角度,该装置可认为是直流配电网中电压平衡器(安装在VSC侧,控制正负极电压相等,对配电网呈现电压源特性)的对偶,因此称之为前端电流平衡器。

在理想网络条件下(换流站侧正负极电压对称、正负极传输线路电阻特性一致),若每个用户处均设有电流平衡器,则对任意用户而言,其与配电网连接处正负极电压必然相等。此时极间电流平衡即为功率平衡。

### 3 计及电流平衡器的分布式电源双极性接入

基于2.2节中所述电流平衡器的概念,本节将给出一种适用于小容量用户终端的分布式可再生能源接入双极性低压直流配电网技术方案,该方案可实现接入点正负极电流有效平衡。其基本系统结构如图4所示。

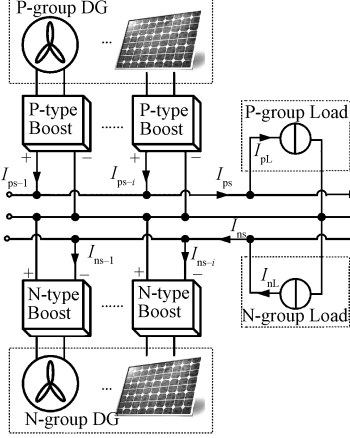


图4 含前端电流平衡器的分布式电源并入三线制双极性低压直流配电网系统结构示意图

Fig. 4 DG integration with a front-end current balancer in three-wire bipolar distribution system

#### 3.1 系统结构

由图4可见,该系统含有多种相互独立的分布式可再生能源发电装置(如小型风机、光伏面板等),分布式电源依照各自容量平均分配为正极组(P-group)与负极组(N-group),分别通过P型Boost变换器(P-type Boost)与N型Boost变换器(N-type Boost)接入用户端直流电网的正极侧和负极侧;同时用户线路出口处挂接前端电流平衡器,以实现用户节点与外电网间所交换的正、负极电流相等。P型Boost变换器与N型Boost变换器拓扑结构分别如图5(a)和图5(b)所示。

系统中各处电流、电压参考方向、极性见图4。任意时刻,将正极组第*i*个分布式电源输出电流记作 $I_{ps-i}$ ,负极组第*i*个分布式电源输出电流记作 $I_{ns-i}$ ,则正、负极两侧电流关系分别表达为:

$$I_{p1} = I_{ps} - I_{pL} = \sum_{i=1}^{N_p} I_{ps-i} - I_{pL} \quad (21)$$

$$I_{n1} = I_{ns} - I_{nL} = \sum_{i=1}^{N_n} I_{ns-i} - I_{nL} \quad (22)$$

式中, $N_p$ 和 $N_n$ 分别为正、负极组分布式电源数量; $I_{pL}$ 和 $I_{nL}$ 分别为接入正、负极两侧等效负荷电流。

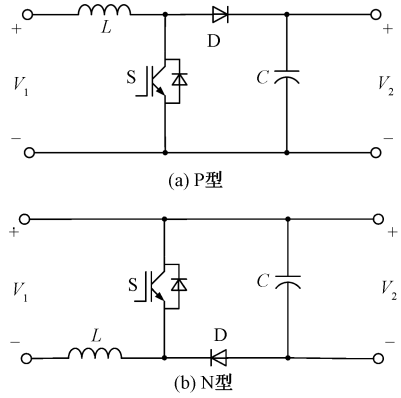


图5 P/N型Boost电路拓扑

Fig. 5 P/N-type Boost converter topologies

在电流平衡器控制作用下,该用户单元与外部配电网正负极线路间交换电流相等,结合割集KCL有:

$$\Delta I_2 = I_{n2} - I_{p2} = 0 \quad (23)$$

式中, $\Delta I_2$ 为该用户节点与直流配电网中性线交换的电流; $I_{p2}$ 和 $I_{n2}$ 分别为经过前端电流平衡器调节后的正、负极线路电流。对节点N1、N2、N3使用KCL可得:

$$\begin{cases} \Delta I_p = I_{p1} - I_{p2} \\ \Delta I_n = I_{n2} - I_{n1} \end{cases} \quad (24)$$

$$\Delta I_p + \Delta I_n = \Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 \quad (25)$$

式中, $\Delta I_p$ 和 $\Delta I_n$ 分别为电流平衡器正、负极端口电流(参考方向见图4)。假定电流平衡器工作于稳态且自身无功率消耗,则由两端口系统功率平衡条件推导出:

$$V_{dc-p} \Delta I_p = V_{dc-n} \Delta I_n \quad (26)$$

联立式(23)~式(26),可得:

$$\begin{cases} \Delta I_p = \frac{I_{p1} - I_{n1}}{1 + k} \\ \Delta I_n = \frac{k(I_{p1} - I_{n1})}{1 + k} \end{cases} \quad (27)$$

$$\Delta I_1 = I_{p1} - I_{n1} \quad (28)$$

$$P_t = \frac{(I_{p1} - I_{n1}) V_{dc-p} V_{dc-n}}{V_{dc-p} + V_{dc-n}} \quad (29)$$

式中, $k = V_{dc-p}/V_{dc-n}$ ;  $P_t$ 为正极侧向负极侧传递的转移功率。特别地,当用户接入点正负极电压对称时( $k = 1, V_{dc-p} = V_{dc-n} = V_{dc}$ ),有:

$$\Delta I_p = \Delta I_n = \frac{1}{2}(I_{p1} - I_{n1}) \quad (30)$$

$$P_t = \frac{1}{2}(I_{p1} - I_{n1}) V_{dc} \quad (31)$$



### 3.2 工作机理

本节将针对图4系统中关键电力电子装置的拓扑结构与工作机理进行分析,得出其稳态下工作特性方程。

#### 3.2.1 P/N 型 Boost 变换器

该系统中使用非隔离型变换器作为分布式电源接入直流配电网的前端变换装置,以实现升压变换与最大功率点跟踪(MPPT)功能,此处选用 Boost 型电路拓扑。

P 型 Boost 变换器拓扑结构为常规 Boost 电路,如图5(a)所示,输入-输出侧为“共负极”结构。该变换器输入端与分布式电源相连,输出端正、负极分别与配电网正极线、中性线相连接。

N 型 Boost 变换器拓扑结构为常规 Boost 电路衍生而来,如图5(b)所示,输入-输出侧为“共正极”结构。该变换器输入端与分布式电源相连,输出端正、负极分别与中性线、配电网负极线相连接。

由电路对称性易知,上述两种结构的 Boost 电路工作机理相仿,此处不再赘述,其稳态电压增益均为:

$$G = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1-D} \quad (32)$$

式中, $D$  为开关管导通占空比。

#### 3.2.2 前端电流平衡器

由2.2节和3.1节中理论分析可知,前端电流平衡器的核心功能在于建立正负极两侧间能量转移通路,从而实现用户接入点正负极线路电流相等的控制目标<sup>[8-14]</sup>。可见,其物理本质与工作机理同VSC侧电压平衡器一致,因此其具体设计可在借鉴电压平衡器既有拓扑的基础上,通过引入新的闭环控制策略而实现<sup>[15-17]</sup>。

根据3.1节中所述的具体应用场景,考虑电压等级与容量,本文选择桥式功率转移电路作为前端电流平衡器拓扑结构,如图6所示。其稳态工作机理分析如下。

##### (1) 模式 1

当 $I_{p1}$ 大于 $I_{n1}$ 时, $S_2$ 保持关断,通过控制 $S_1$ 的导通和关断,实现极间电流转移。当 $S_1$ 导通时,形成回路 $S_1-L-I_{p1}$ 与回路 $S_1-L-I_{n1}-C$ ,由电容 $C$ 与正极电流源 $I_{p1}$ 向电感 $L$ 中充入能量;当 $S_1$ 关断时, $S_2$ 中反并联二极管将导通续流,进而形成回路 $L-I_{n1}-S_2$ (续流二极管)与 $L-I_{p1}-C-S_2$ (续流二极管),从而释放电

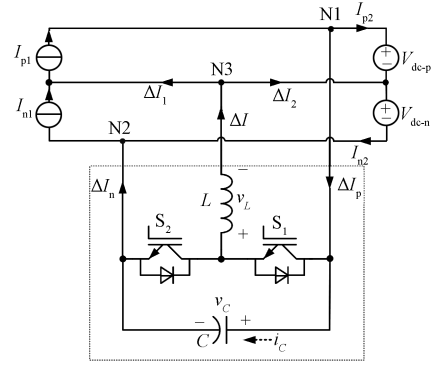


图6 前端电流平衡器拓扑结构

Fig.6 Topology of front-end current balancer

感 $L$ 能量并通过正极电流源 $I_{p1}$ 向电容 $C$ 补充能量。此时,在完整开关周期内, $N1/N3$ 端口始终从正极侧吸收功率(电流), $N2/N3$ 端口始终向负极侧释放功率(电流),由此实现从正极侧到负极侧的电流(功率)转移。

##### (2) 模式 2

当 $I_{p1}$ 小于 $I_{n1}$ 时, $S_1$ 保持关断,通过控制 $S_2$ 的导通和关断,实现极间电流转移。当 $S_2$ 导通时,形成回路 $S_2-I_{n1}-L$ 与回路 $C-I_{p1}-L-S_2$ ,由电容 $C$ 与负极电流源 $I_{n1}$ 向电感 $L$ 中充入能量;当 $S_2$ 关断时, $S_1$ 中反并联二极管将导通续流,进而形成回路 $L-S_1$ (续流二极管)- $I_{p1}$ 与回路 $C-I_{n1}-L-S_1$ (续流二极管),从而释放电感 $L$ 能量并通过负极电流源 $I_{n1}$ 向电容 $C$ 补充能量。此时,在完整开关周期内, $N1/N3$ 端口始终向正极侧释放功率(电流), $N2/N3$ 端口始终从负极侧吸收功率(电流),由此实现从负极侧到正极侧的电流(功率)转移。

电流平衡器达到理想稳态时,忽略电容电压纹波,可认为电压 $v_c$ 保持稳定,其等于网侧正负极总电压。此时可认为开关周期内,流过电容的平均电流为零,即有:

$$i_c = 0 \quad (33)$$

此时各端口吸收/释放的电流/功率数值可由式(27)~式(31)计算。

无论在模式1或模式2下,当 $S_1$ 或 $S_2$ 导通时,流经电感 $L$ 的电流 $\Delta I$ 将增大;当 $S_1$ 或 $S_2$ 关断时, $\Delta I$ 将减小。因此可通过改变 $S_1$ 或 $S_2$ 的占空比 $d_1$ 或 $d_2$ 调节极间等效转移电流的大小,从而达到稳态( $I_{p2} = I_{n2}$ ,  $\Delta I_2 = 0$ ),具体控制框图如图7所示。

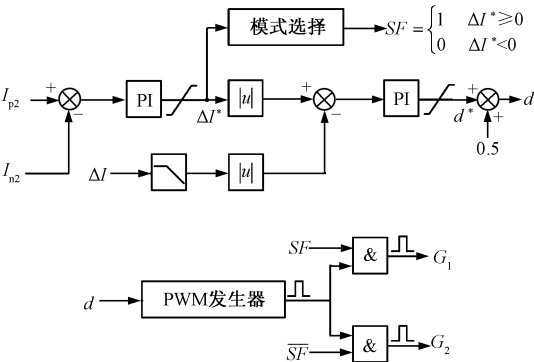


图7 前端电流平衡器控制策略

Fig.7 Control strategy of front-end current balancer

4 仿真验证

本节在 MATLAB-Simulink 环境下进行系统仿真,验证所提出的接入系统方案与所选用的前端电流平衡器的电路拓扑、控制策略。

4.1 系统结构与仿真条件

仿真中选用图4的系统架构、图5的正、负极组分布式电源接入变换器拓扑以及图6的前端电流平衡器拓扑。

网侧直流电压±375V,正/负极线、中性线等效电阻均为0.1Ω;前端电流平衡器电感1mH,开关频率20kHz;正负极线路间总等效电容300μF。

正负极分别接入相同规格光伏阵列 PV-1 与 PV-2,其饱和光照下最大功率点电压328.2V,最大功率点电流33.48A,最大输出功率10.99kW;光伏组件分别由P/N型Boost电路连接到正负极侧。

仿真时间1.5s,步长1μs;改变PV-1与PV-2的光照条件,调节其输出功率,进而验证前端电流平衡器不同工况下均衡控制效果,相关结果如下。

4.2 仿真结果

各时段下PV-1和PV-2光照强度数值见表1。当t=0.5s时前端电流平衡器投入运行,0.5s与1.0s前后正、负极线路电流I<sub>p2</sub>、I<sub>n2</sub>与中性线电流ΔI<sub>2</sub>波形如图8所示。

表1 各仿真时段阵列 PV-1、PV-2 辐照度变化情况

Tab.1 Changes of irradiance on PV-1 and PV-2

时段/s	光照强度/(W/m <sup>2</sup> )	
	PV-1	PV-2
0~1.0	800	600
1.0~1.5	800	1000

由图8可见,电流平衡器启动前正极线电流I<sub>p2</sub>平均值22.5A,负极线电流I<sub>n2</sub>平均值16.5A,中性线

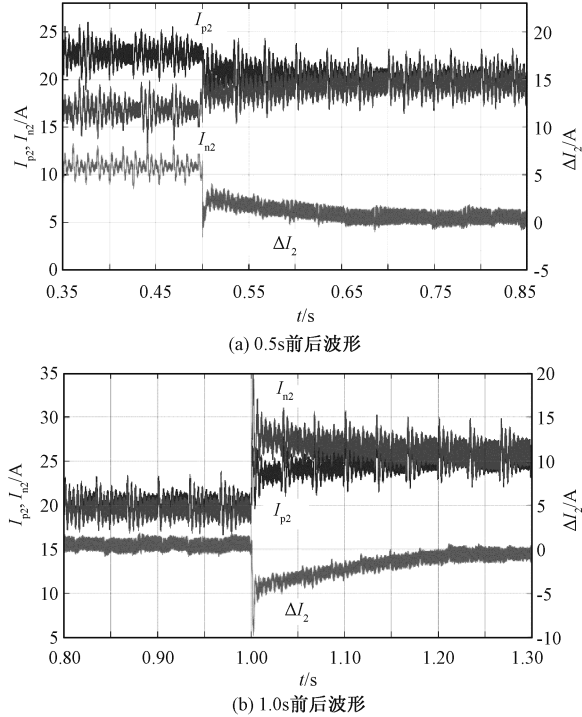


图8 线路电流波形

Fig.8 Waveforms of line current

电流ΔI<sub>2</sub>平均值6.0A;t=0.5s时电流平衡器投入,I<sub>p2</sub>逐渐减小,同时I<sub>n2</sub>逐渐增大,t=0.75s时达到平衡。当t=1.0s时PV-2输出功率阶跃增加,使I<sub>n2</sub>突增,ΔI<sub>2</sub>小于零;随即在电流平衡器控制下逐步恢复,于t=1.25s时重新达到平衡。

上述仿真结果表明本文所提出的前端电流平衡器电路拓扑与控制策略合理有效,相应的分布式可再生能源发电单元接入双极性低压直流配电系统方案正确合理,可实现预期功能。

5 结论

在用户与双极性直流配电网公共连接点处配备前端电流平衡器,可有效平抑由分布式电源与负荷波动造成的正、负极线路电流不均衡现象,使稳态下中性线平均电流为零。

通过在全部用户连接点配备前端电流平衡器,可控制任意用户节点与配电网正、负极侧交换电流相等,从而在理想网络条件(正负极支撑电压、线路电阻特性完全一致)下保证稳态时双极性直流配电网中正负极电流、电压、功率处处均衡,提升电能质量。

采用P/N型Boost电路与桥式功率转移电路相互配合,可构建适用于低压双极性直流配电网的可

再生能源发电接入系统,实现分布式电源与负荷的高效、灵活直流接入。

本文研究内容及相关成果,将为解决未来直流配电系统中极间均衡控制与电能质量问题提供新的技术思路,从而有效促进未来直流配电系统建设、运行与分布式可再生能源发电的直流并网。

## 参考文献 (References):

- [1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等 (Song Qiang, Zhao Biao, Liu Wenhua, et al.). 智能直流配电网研究综述 (An overview of research on smart DC distribution power network) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (25): 9-19.
- [2] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等 (Wu Weimin, He Yuanbin, Geng Pan, et al.). 直流微网研究中的关键技术 (Key technologies for DC micro-grids) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (1): 98-113.
- [3] Moia J, Lago J, Perin A J, et al. Comparison of three-phase PWM rectifiers to interface AC grids and bipolar DC active distribution networks [A]. 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) [C]. 2012. 221-228.
- [4] Kakigano H, Miura Y, Ise T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (12): 3066-3075.
- [5] 蒋智化, 刘连光, 刘自发, 等 (Jiang Zhihua, Liu Lianguang, Liu Zifa, et al.). 直流配电功率控制策略与电压波动研究 (Research on power flow control and the voltage fluctuation characteristics of DC distribution networks based on different control strategies) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (4): 919-926.
- [6] 雷志方, 汪飞, 高艳霞, 等 (Lei Zhifang, Wang Fei, Gao Yanxia, et al.). 面向直流微网的双向 DC-DC 变换器研究现状和应用分析 (Research status and application analysis of bidirectional DC-DC converters in DC micro-grids) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (22): 137-147.
- [7] 汪飞, 雷志方, 徐新蔚 (Wang Fei, Lei Zhifang, Xu Xinwei). 面向直流微电网的电压平衡器拓扑结构研究 (Research on topologies of voltage balancers applied in DC micro-grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (6): 1604-1612.
- [8] Lago J, Heldwein M L. Operation and control-oriented modeling of a power converter for current balancing and stability improvement of DC active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (3): 877-885.
- [9] 张先进, 龚春英, 李佳滨 (Zhang Xianjin, Gong Chunying, Li Jiabin). 一种半桥电压均衡电路 (A half-bridge voltage balancing circuit) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2013, 50 (6): 124-128.
- [10] Kim H J, Han B M. Operation analysis of bipolar DC distribution system with new half-bridge voltage balancer [A]. 2015 IEEE International Conference on Building Efficiency and Sustainable Technologies [C]. Singapore, 2015. 62-67.
- [11] Zhang X J, Gong C Y. Dual-Buck half-bridge voltage balancer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (8): 3157-3164.
- [12] 张先进, 龚春英 (Zhang Xianjin, Gong Chunying). 三电平半桥电压平衡器 (Three-level half bridge voltage balancers) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (8): 114-119.
- [13] Zhang X J, Gong C Y, Yao Z L. Three-level DC converter for balancing DC 800-V voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (7): 3499-3507.
- [14] Zhang C, Jiang D Z, Zheng H, et al. A bi-directional Buck/Boost voltage balancer for DC distribution system [A]. 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation [C]. 2013. 9-13.
- [15] 黄震 (Huang Zhen). 未来海上直流型风电场单双极性转换接口 DC-DC 变换器的研究 (Research on unipolar-to-bipolar interface DC-DC converter for future DC-based offshore wind farms) [D]. 上海: 上海交通大学 (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University), 2015.
- [16] Ma J J, Li Y, Zhu M, et al. Parallel operation of distributed voltage balancers for bipolar DC system with improved reliability and efficiency [A]. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. Beijing, 2017. 1387-1392.
- [17] Ma J J, Zhu M, Li Q, et al. From 'voltage balancer' to 'interlinking converter' - A shift of operation concept for bipolar DC distribution system [A]. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. Beijing, 2017. 1166-1171.

**Bipolar balancing strategy of DC distribution system  
based on front-end current balancer**

LI Qiong<sup>1</sup>, ZHU Miao<sup>1</sup>, LI Xiu-yi<sup>1</sup>, HE Guo-qing<sup>2</sup>, CAI Xu<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to cope with technical challenges of bipolar balancing and power quality issues of DC distributed system, a new solution based on front-end current balancer (FECB) has been proposed in this paper, which will be operated in the scenario of high percentage distributed generation (DG). The positive- and negative-line currents for each user node could be balanced by installing FECB at each corresponding PCC. The whole system will be operated symmetrically under an ideal network condition. A novel FECB topology has been further proposed together with corresponding strategy. For DG integration with bipolar DC distribution system, a detailed solution is given on the basis of P/N-type Boost converters. In this scheme, both high efficiency flexible integration of DG units and balanced line currents on each user node can be obtained in order to guarantee the symmetrical operation of distribution system. All theoretical results have been validated by simulation. The proposed scheme has a potential application value in future DC distribution system and DC integration of renewable energy.

**Key words:** bipolar DC distribution system; bipolar balance control; front-end current balancer; distributed generation; P/N-type Boost converter