

# 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究

张树东<sup>1</sup>, 朱大为<sup>2</sup>, 刘闯<sup>2</sup>, 张晔<sup>1</sup>, 田孝铜<sup>2</sup>

(1. 吉林省电力公司长春供电公司, 吉林 长春 130021; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 提出了基于通用功率变换器的交直流混合配电网系统架构概念, 在解决传统交流配电网电能质量问题同时, 满足直流配电网发展需求。首先提出了一种结合电压平衡控制器(VBC)和四桥臂型三相四线制电压源变换器(VSC)的新型 UPC 整体系统结构, 并给出一种基于交流电流跟踪补偿的并网 VSC 和基于恒定直流电流脉冲触发模式的 VBC 整体协调控制策略。最后通过搭建 75 kW 仿真实验系统验证了 UPC 在直流配电、分布式电源直流并网和交流配电网电能质量治理等方面性能的有效性。

**关键词:** 交直流混合配电; 通用功率变换器; 无功补偿; 谐波治理; 单位功率因数; 分布式电源

## Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC distribution

ZHANG Shudong<sup>1</sup>, ZHU Dawei<sup>2</sup>, LIU Chuang<sup>2</sup>, ZHANG Ye<sup>1</sup>, TIAN Xiaotong<sup>2</sup>

(1. Changchun Power Supply Company, Jilin Electric Power Company, Changchun 130021, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The concept of universal power converter (UPC) based hybrid AC and DC distribution system architecture is proposed, which can solve the traditional AC distribution power quality problems and satisfy the demand of DC distribution development. First, a novel UPC system structure combining the voltage balancing controller (VBC) with the four-leg based three-phase four-wire voltage source converter (VSC) is adopted, using the overall coordination control scheme of the AC current tracking compensation based grid-interfaced VSC and the constant DC current burst mode based VBC. In the end, the 75 kW simulation experimental system is designed and tested to verify the performance of the proposed UPC under DC distribution and distributed DC sources conditions, as well as the power quality management of AC distribution.

This work is supported by Science and Technology Project State Grid Corporation of China (No. 201522022000142).

**Key words:** hybrid AC and DC distribution; universal power converter; reactive power compensation; harmonic elimination; unity power factor; distributed generation

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2016)01-0048-08

## 0 引言

严峻的能源形势和人类生态环境压力下, 世界各国都将开发利用可持续的清洁能源作为未来的能源发展战略, 其中以太阳能、风能、燃料电池等为代表的分布式能源(Distributed Generation, DG)已成为各国关注的热点<sup>[1-2]</sup>。目前, 采用交流配电网实现 DG 的接入及对直流负荷供电时, 需要大量的换流器和多级电能变换, 不符合 DG 与直流负荷量小面

多的特点, 投资大, 效率低<sup>[3-6]</sup>。相比交流配电方式, 直流配电的供电能力更强、更可靠、更高效。将直流负荷和 DG 接入直流配电网既避免了接入交流网时所产生的频率稳定和无功功率平衡等问题, 又能节省变换器数量和电能变换级数, 具有突出的节能优势。研究表明<sup>[7]</sup>低压直流供电方式可以兼容目前大部分的低压交流负荷, 能降低配电网电能损耗、增强供电可靠性、提高电能质量。因此, 随着配电网中 DG 的广泛接入和直流负荷的大量增加, 在现有交流配电的基础上, 采用交直流混合型配电将是未来配电网的一大趋势。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(合同编号: 201522022000142)

本文采用的通用功率变换器(Universal Power Converter, UPC)在兼具传统功率变换器的 DG 并网和交流网无功与谐波补偿等功能外, 既能平衡三相不对称交流负荷, 实现变压器三相电流对称且获得单位功率因数, 还能通过直流侧的双极三线制供电结构提供两个直流电压等级, 提高直流网的供电灵活性。而且, UPC 中基于恒定直流电流脉冲触发模式控制的 VBC 单元能实现双极三线制直流网中负荷或 DG 分布不平衡时两极直流电压保持平衡。UPC 将避免以往 DG 并网设备利用率低及频繁

投切对局部电网稳定造成的影响, 实现一机多用, 简化系统结构, 节省设备投资<sup>[8-9]</sup>。

## 1 新型 UPC 系统结构

如图 1 所示, UPC 主要由三相四线制电压源型变换器(Voltage Source Converter, VSC)和电压平衡控制器(Voltage Balancing Controller, VBC)两部分构成。VSC 起到 DG 并网变换器和交流配电网电能质量综合治理的作用, VBC 起到双极性直流配电网正负两极电压平衡控制的作用。

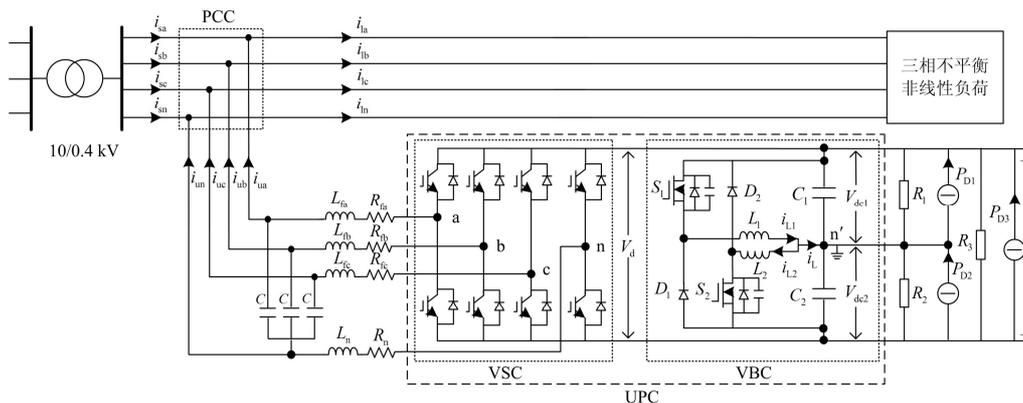


图 1 UPC 系统整体结构

Fig. 1 UPC overall system architecture

因 UPC 应用于三相四线制低压配电网中, 故其前端的 VSC 选用四桥臂型三相四线制结构<sup>[10-12]</sup>。作为整体统一控制的 VSC 前三个桥臂用于补偿交流配电网中正序和负序谐波电流, 第四桥臂主要调控交流配电网的零序电流。此外, 采用 LC 滤波器滤除 UPC 并网电流中的高频分量, 减少其影响配电网中对电磁干扰较敏感的负荷。为满足直流负荷及 DG 对电压等级的要求, 并使直流网电压等级与现有交流负荷相匹配, VSC 直流侧总电压  $V_d$  控制稳定在(760 V,  $\pm 5\%$ )。图 1 中  $i_s$ 、 $i_u$ 、 $i_l$  分别代表交流网中变压器电流、UPC 并网电流和交流负荷电流;  $L_f$ 、 $R_f$  代表 VSC 前三桥臂的滤波电感和电阻;  $L_n$ 、 $R_n$  代表 VSC 第四桥臂的滤波电感和电阻;  $C$  为滤波电容;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别表示直流网中连接于正极、负极与中性线之间或正极与负极之间额定电压为 380 V 或 760 V 的直流负荷的等效电阻;  $P_{D1}$ 、 $P_{D2}$ 、 $P_{D3}$  分别表示用以模拟直流网中连接于正极、负极与中性线之间或正极与负极之间额定电压为 380 V 或 760 V 的 DG 的电流源发电功率。

VBC 由左、右两个桥臂组成, 两个桥臂中功率开关  $S_1$  和  $S_2$  独立控制, 避免了传统桥式拓扑结构中功率开关直通问题, 提高了系统可靠性。通过 VBC 模块构造一条中线, 形成双极性三线制直流配

电网络结构。然而, 直流网中负荷或 DG 在两极之间分布不平衡将导致其正负极电压  $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$  不对称, 控制  $V_d$  满足运行要求的同时, 还应控制直流网正负极电压平衡。因此, 先通过 VSC 使  $V_d$  保持在 760 V 左右, 再通过 VBC 使直流网正负极电压稳定在 380 V 左右而不受直流负荷或 DG 分布不平衡的影响。这样, 直流网就具有 760 V 和 380 V 两个电压等级, 提高了 DG 和负荷分布的灵活性。

## 2 UPC 中 VSC 整体协调控制研究

### 2.1 VSC 基本补偿原理

因 UPC 运行时, VSC 与 VBC 的功能和控制相互独立, 故分析 VSC 时将 VSC 直流端以外的部分整体划入直流网考虑, 其简化原理图如图 2 所示。

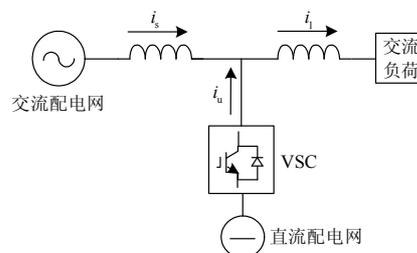


图 2 VSC 系统简化图

Fig. 2 Simplified VSC system diagram

为使交流配电网前端工频变压器只提供三相平衡的正序基波有功功率, 故根据功率平衡准则, 负荷所需的无功和谐波功率必须由 UPC 完全提供。设交流配电网非线性不对称负荷电流为  $i_l$ , 变压器出口端电流为  $i_s$ , UPC 并网电流为  $i_u$ , 由图 2 得

$$i_s = i_l - i_u \quad (1)$$

非线性负荷电流  $i_l$  包含基波有功电流分量  $i_p$ 、基波无功电流分量  $i_q$ 、谐波电流分量  $i_h$ , 即

$$i_l = i_p + i_q + i_h \quad (2)$$

当  $i_u = i_q + i_h$  时, 则  $i_s = i_p$ , 即交流网只提供有功电流而不受负荷电流中谐波和无功电流的污染。此时, 并不能保证配电变压器三相电流平衡, 尤其当各相负荷有功功率差异较大时, 变压器三相电流幅值将有显著差异。为解决上述问题, 应在混合配电网的总负荷功率中扣除由直流网中 DG 提供的功率外, 将剩余功率在变压器三相之间平均分配, 即

$$P_{sa} = P_{sb} = P_{sc} = \frac{1}{3}(P_{lavg} + P_u - P_d) \quad (3)$$

不考虑配电网三相电压畸变与不平衡时, 式(3)可使变压器三相有功电流幅值相等, 若进一步使各相电流与电压相角保持同步, 将实现变压器三相负荷不平衡时, 其出口端三相电流对称且功率因数近似为 1。此外, VSC 还需根据各相负荷功率需求对变压器三相对称有功电流进行再次转换和分配, 并完全提供各相负荷所需的无功功率。

## 2.2 VSC 并网指令电流算法

因基于瞬时功率理论补偿电流算法涉及多次  $\alpha\beta$  或  $dq$  变换, 运算复杂, 且不能平衡三相不对称负荷电流。因而, 本文采用基于能量平衡的时域补偿电流算法以简化计算, 并使负荷不平衡时变压器三相电流对称, 其框图如图 3 所示。当电网电压严重畸变时, 为获得满意的补偿效果, 应先采用瞬态对称分量法从三相不对称电压中分离出三相正序基波电压分量后, 再进行 UPC 补偿电流参考值计算。

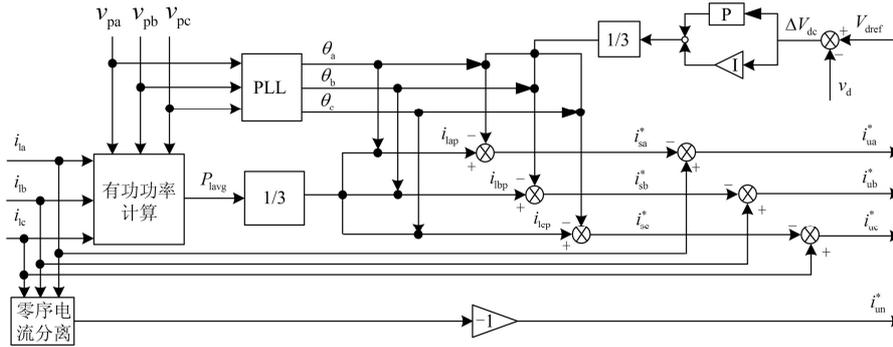


图 3 UPC 并网参考电流算法结构框图

Fig. 3 Block diagram of UPC grid-connected reference current algorithm

考虑 DG 并网时, 交流负荷功率由变压器和 DG 共同提供。设三相交流负荷总有功功率为  $P_{lavg}$ , 直流配电网总有功消耗和 DG 发电总功率分别为  $P_u$  和  $P_d$ , 则有

$$P_d = P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} \quad (4)$$

设  $i_s^*$ 、 $i_u^*$  分别为变压器电流参考值和 UPC 并网电流参考值, 其计算为

$$\begin{cases} i_{ua}^* = i_{la} - i_{sa}^* = i_{la} - \frac{v_{pa1}^+}{\Delta^+} (P_{lavg} + P_u - P_d) \\ i_{ub}^* = i_{lb} - i_{sb}^* = i_{lb} - \frac{v_{pb1}^+}{\Delta^+} (P_{lavg} + P_u - P_d) \\ i_{uc}^* = i_{lc} - i_{sc}^* = i_{lc} - \frac{v_{pc1}^+}{\Delta^+} (P_{lavg} + P_u - P_d) \\ i_{un}^* = -(i_{ua}^* + i_{ub}^* + i_{uc}^*) = -(i_{la} + i_{lb} + i_{lc}) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\Delta^+ = (v_{pa1}^+)^2 + (v_{pb1}^+)^2 + (v_{pc1}^+)^2$ ,  $v_{pa1}^+$ 、 $v_{pb1}^+$ 、 $v_{pc1}^+$  为 PCC 点处三相电压  $v_{pa}$ 、 $v_{pb}$ 、 $v_{pc}$  的基波正序分量。该文近似认为交流配电网三相电压对称且仅含基波正序电压分量, 并设  $\theta_a$ 、 $\theta_b$ 、 $\theta_c$  分别为  $v_{pa}$ 、 $v_{pb}$ 、 $v_{pc}$  的相角, 则式(5)可化简为

$$\begin{cases} i_{ua}^* = i_{la} - \frac{1}{|v_{pa}|} \left( \frac{P_{lavg} + P_u - P_d}{3} \right) \angle \theta_a \\ i_{ub}^* = i_{lb} - \frac{1}{|v_{pb}|} \left( \frac{P_{lavg} + P_u - P_d}{3} \right) \angle \theta_b \\ i_{uc}^* = i_{lc} - \frac{1}{|v_{pc}|} \left( \frac{P_{lavg} + P_u - P_d}{3} \right) \angle \theta_c \\ i_{un}^* = -(i_{la} + i_{lb} + i_{lc}) \end{cases} \quad (6)$$

即配电变压器平均分担了在系统中扣除 DG 发

电功率后所剩的有功负荷。式中  $P_{\text{lavg}}$  的计算为

$$P_{\text{lavg}} = \frac{1}{T} \int_{t_1-T}^{t_1} (v_{\text{pa}} i_{\text{la}} + v_{\text{pb}} i_{\text{lb}} + v_{\text{pc}} i_{\text{lc}}) dt \quad (7)$$

因  $P_u$  与  $P_d$  的差值将影响  $V_d$  的变化, 当  $P_u - P_d > 0$ , 直流侧电容处于放电状态,  $V_d$  降低; 当  $P_u - P_d < 0$ , 电容处于充电状态,  $V_d$  增大; 当  $P_u - P_d = 0$ , 电容存储能量不发生变化,  $V_d$  保持不变。为保证直流配电网正常供电, 就应通过 VSC 控制  $V_d$  保持在设定值  $V_{\text{dref}}$  左右, 使 UPC 参考电流中应包含相应的电容充放电电流分量以调节电容电压。为此, 采用比例积分(PI)控制器对  $V_d$  进行控制。当  $V_d < V_{\text{dref}}$ , 控制 VSC 并网电流中包含一组从交流电网侧获取的三相对称纯有功电流对电容充电; 当  $V_d > V_{\text{dref}}$ , 控制 VSC 配合变压器和交流负荷将直流侧多余能量注入交流电网。 $P_u$  与  $P_d$  之间满足的计算式为

$$\begin{cases} P_u - P_d = K_p \Delta V_d + K_i \int \Delta V_d dt \\ \Delta V_d = V_{\text{dref}} - V_d \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $K_p$ 、 $K_i$  分别为电压外环中 PI 控制器的比例增益和积分增益。

### 2.3 VSC 控制系统设计

两相同步旋转坐标系( $d$ - $q$ )下 VSC 有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  分别与其电流的  $q$  轴分量  $i_q$  和  $d$  轴分量  $i_d$  呈线性比例关系, 通过调节  $i_q$  和  $i_d$  可独立控制 VSC 的有功和无功功率, 实现  $P$  和  $Q$  的解耦控制。因此, 本文在  $dq$  坐标系下将 VSC 前三桥臂作为整体实现  $PQ$  解耦控制, VSC 采用电流内环和电压外环的双环控制方式。电压外环主要控制 VSC 直流侧总电压  $V_d$  保持在  $V_{\text{dref}}$  上; 电流内环主要实现 UPC 并网电流的快速跟踪, 且内外环均采用 PI 调节器。因滤波电容  $C$  取值较小, 分析 VSC 工作状态时可忽略滤波电容电流对 VSC 的影响, 将  $LC$  近似等效为  $L$  以简化分析<sup>[13]</sup>。基于  $dq$  同步旋转坐标下的 VSC 前三桥臂方程为

$$\begin{cases} v_{\text{od}} = (L_f P + R_f) i_{\text{ud}} + v_{\text{pd}} - \omega L_f i_{\text{uq}} \\ v_{\text{oq}} = (L_f P + R_f) i_{\text{uq}} + v_{\text{pq}} + \omega L_f i_{\text{ud}} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P$  为微分算子;  $d$ 、 $q$  轴方程间存在交叉项, 相互耦合。为消除耦合关系, 可采用前馈解耦控制策略<sup>[14]</sup>, 解耦后的控制方程为

$$\begin{cases} v_{\text{od}} = (K_{\text{ip}} + \frac{K_{\text{il}}}{s})(i_{\text{ud}}^* - i_{\text{ud}}) + v_{\text{pd}} - \omega L_f i_{\text{uq}} \\ v_{\text{oq}} = (K_{\text{ip}} + \frac{K_{\text{il}}}{s})(i_{\text{uq}}^* - i_{\text{uq}}) + v_{\text{pq}} + \omega L_f i_{\text{ud}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $v_{\text{pd}}$ 、 $v_{\text{qd}}$ 、 $v_{\text{od}}$ 、 $v_{\text{oq}}$ 、 $i_{\text{ud}}$ 、 $i_{\text{uq}}$  分别表示 PCC 点处电压  $v_p$ 、VSC 交流侧输出电压  $v_o$  和 UPC 并网电流  $i_u$  的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $K_{\text{il}}$ 、 $K_{\text{ip}}$  为电流内环比例调

节增益和积分调节增益。相比前三桥臂, VSC 第四桥臂通过简单的控制就能产生相应的补偿电流。图 4 为采用 PWM 控制的 VSC 控制框图, 图中没有体现电压外环是因  $i_u^*$  的算法中已经包含了电压外环,  $i_u^*$  中含有调节  $V_d$  保持在  $V_{\text{ref}}$  上的电流分量。

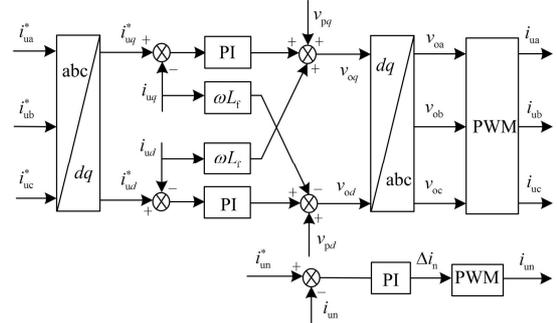


图 4 VSC 控制系统框图

Fig. 4 VSC control system

## 3 UPC 中 VBC 系统控制与分析

### 3.1 VBC 基本控制原理

基于恒定电流脉冲的触发模式控制(Burst mode control)的 VBC 中功率开关  $S_1$ 、 $S_2$  并不是一直处于工作状态, 而是仅在两极直流电压不满足设定值时才会工作, 电感电流  $i_L$  将随着开关状态的改变间歇性存在, 可有效减少开关次数及损耗, 提高效率。根据触发模式控制要求, VBC 需分别设置电压上限  $V_{\text{upper}}$ 、下限  $V_{\text{lower}}$  和允许上限  $V_{\text{upper-allown}}$ 、下限  $V_{\text{lower-allown}}$  以约束直流侧两极电压的运行区间。其基本控制原理为当  $R_1$  大于  $R_2$  时, 电容  $C_1$  两端电压  $V_{\text{dc1}}$  增加, 同时电容  $C_2$  两端电压  $V_{\text{dc2}}$  减小, 但  $V_d$  因 VSC 的控制而保持不变。此时, 开关  $S_1$  导通, 电感电流  $i_{L1}$  逐渐增大, 当  $V_{\text{dc2}}$  电压升高至  $V_{\text{lower-allown}}$  值时,  $S_1$  断开, 电流由二极管  $D_1$  续流, 通过电感  $L_1$  将多余能量从上电容传递到下电容。同理, 当  $R_1$  小于  $R_2$  时,  $V_{\text{dc1}}$  减小,  $V_{\text{dc2}}$  增大,  $V_d$  保持不变。此时, 开关  $S_2$  导通, 电感电流  $i_{L2}$  逐渐增大, 当  $V_{\text{dc1}}$  电压降低至  $V_{\text{upper-allown}}$  值时,  $S_2$  断开, 电流由二极管  $D_2$  续流, 过电感  $L_2$  将多余能量从下电容传递到上电容, 达到平衡电压的目的, 其四个过程分别如图 5 中 a、b、c、d 所示。由图 5 知,  $V_{\text{upper-allown}}$ 、 $V_{\text{lower-allown}}$ 、 $V_{\text{upper}}$ 、 $V_{\text{lower}}$  的大小影响直流两极电压的稳态偏差和 VBC 开关占空比, 进而影响系统损耗。因此, 应综合考虑, 设置合理的电压允许上下限。

在  $V_d$  满足运行要求而直流负荷或 DG 分布不平衡时, 通过电感  $L_1$  或  $L_2$  的电流  $i_L$  只有达到一定值时, 才能快速实现上下电容之间的能量传递, 实现两极电压平衡。因此, 电感电流参考值  $i_{L\text{ref}}$  的设定

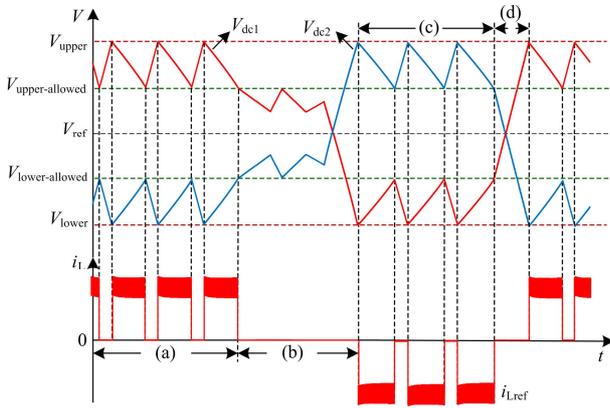


图 5 VBC 电流脉冲触发模式控制原理图

Fig. 5 Schematic diagram of VBC current pulse burst mode control

必须满足相应条件。以  $R_1 > R_2$  为例，若无电压平衡控制时，则有  $V_{dc1} > V_{ref} > V_{dc2}$ ， $V_{ref} = 1/2 V_d$ 。为使两极直流电压平衡， $i_L$  必须满足  $(i_L + V_{dc1}/R_1) \times R_2 > V_{ref}$ 。若  $(i_L + V_{upper-allowed}/R_1) \times R_2 = V_{lower-allowed}$  时，VBC 功率开关一直导通， $i_L$  始终存在；若  $i_L$  进一步满足  $(i_L + V_{upper-allowed}/R_1) \times R_2 > V_{lower-allowed}$ ，则  $i_L$  间歇性存在，能减少开关次数及 VBC 工作损耗，提高运行效率。极限情况下，如当  $R_1$  开路时，VBC 所能可靠供电的负荷  $R_2$  应大于  $V_{ref}/i_{Lref}$ 。

### 3.2 VBC 数学模型

如图 1 中 VBC 的拓扑结构，并根据功率开关的状态列写系统方程。当  $S_1$  导通时，

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_d - V_{dc2} \\ C_2 \frac{dV_{dc2}}{dt} = i_{L1} + C_1 \frac{d(V_d - V_{dc2})}{dt} + \frac{V_d - V_{dc2}}{R_1} - \frac{V_{dc2}}{R_2} \end{cases} \quad (11)$$

当  $S_1$  关断时，

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = -V_{dc2} \\ C_2 \frac{dV_{dc2}}{dt} = i_{L1} + C_1 \frac{d(V_d - V_{dc2})}{dt} + \frac{V_d - V_{dc2}}{R_1} - \frac{V_{dc2}}{R_2} \end{cases} \quad (12)$$

对上式进一步分析可得到电感电流  $i_{L1}$  和占空比  $d_1$  之间的传递函数为

$$G_1(S) = \frac{i_{L1}}{d_1} = \frac{2CR_1R_2s + R_1 + R_2}{2L_1CR_1R_2s^2 + L_1(R_1 + R_2)s + R_1R_2} V_d \quad (13)$$

同理， $i_{L2}$  与占空比  $d_2$  之间的传递函数为

$$G_2(S) = \frac{i_{L2}}{d_2} = \frac{2CR_1R_2s + R_1 + R_2}{2L_2CR_1R_2s^2 + L_2(R_1 + R_2)s + R_1R_2} V_{dc} \quad (14)$$

式中， $C=C_1=C_2$ ，因  $L_1$  与  $L_2$  取值相同，对比式(13)和式(14)可知，VBC 左右桥臂具有相同的传递函数。因此，结合恒定电流脉冲触发模式控制的 VBC 整

体控制框图如图 6 所示。

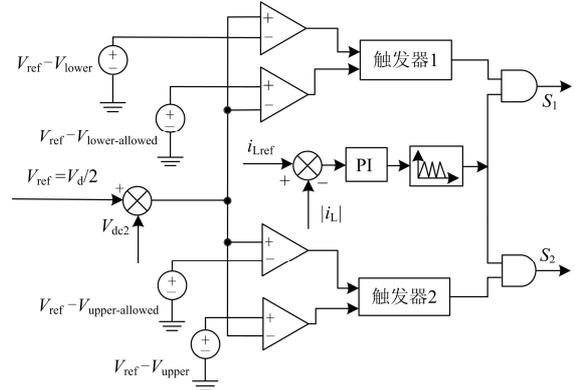


图 6 VBC 控制系统框图

Fig. 6 VBC control system block diagram

## 4 实验仿真分析

为验证并网模式下 UPC 运行的可行性，本文在 PSIM 仿真软件中搭建额定功率为 75 kW 的仿真实验系统，各仿真参数如表 1 所示，表中交流配电网中各相所并入的交流谐波电流源用以模拟相应的非线性负荷。文中假设交流配电网三相电压对称且仅含基波正序分量。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

仿真参数	数值
VSC 参数	$R_{fa}=R_{fb}=R_{fc}=5 \text{ m}\Omega$ $L_{fa}=L_{fb}=L_{fc}=400 \text{ }\mu\text{H}$ $L_n=800 \text{ }\mu\text{H}$ $C=10 \text{ }\mu\text{F}$ $V_{dref}=760 \text{ V}$
VBC 参数	$C_1=C_2=19 \text{ mF}$ $L_1=L_2=200 \text{ }\mu\text{H}$ $V_{upper-allown}=381.8 \text{ V}$ $V_{upper}=382.2 \text{ V}$ $V_{lower-allown}=378.2 \text{ V}$ $V_{lower}=377.8 \text{ V}$ $V_{ref}=380 \text{ V}$ $i_L=50 \text{ A}$
三相交流负荷	$Z_a=3+j3.14 \text{ }\Omega$ $Z_b=5+j3.77 \text{ }\Omega$ $Z_c=3+j4.71 \text{ }\Omega$
交流谐波电流源	$I_{ah3}=5 \text{ A}$ $I_{ah5}=3 \text{ A}$ $I_{bh3}=2 \text{ A}$ $I_{bh5}=2 \text{ A}$ $I_{bh7}=1 \text{ A}$ $I_{ch3}=5 \text{ A}$ $I_{ch7}=1 \text{ A}$ $I_{ch11}=0.5 \text{ A}$
交流负荷扰动功率	$P'_a=9.68 \text{ kW}$ $P'_b=0$ $P'_c=9.68 \text{ kW}$
直流负荷	$R_1=20 \text{ }\Omega$ $R_2=10 \text{ }\Omega$
直流负荷扰动功率	$P'_{d1}=14.44 \text{ kW}$ $P'_{d2}=0$
DG 发出功率	$P_{D1}=9.5 \text{ kW}$ $P_{D2}=3.8 \text{ kW}$
DG 扰动功率	$P'_{D1}=3.8 \text{ kW}$ $P'_{D2}=-0.76 \text{ kW}$
开关频率	25 kHz

### 4.1 不考虑 DG 并网时仿真结果

图 7、图 8 分别为 UPC 未并网补偿和并网补偿后，交流配电网中变压器三相电流及中性线电流波形，其电流有效值( $A_{RMS}$ )、电流不平衡度( $CUD$ )、电

流谐波率( $THD$ )、功率因数( $PF$ )等参数分析分别如表 2 (a)、表 2(b)所示。

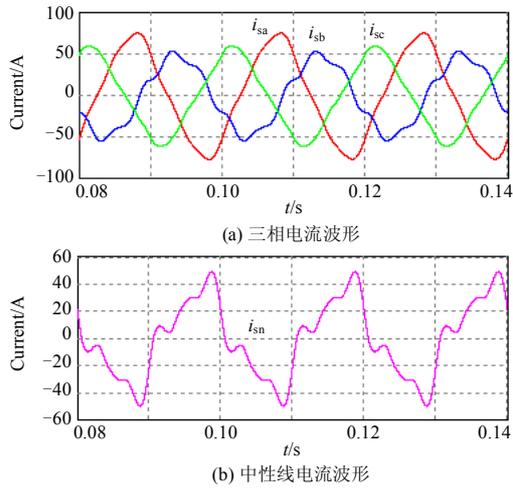


图 7 UPC 未并网补偿时变压器电流波形

Fig. 7 Transformer current waveform without UPC interconnection

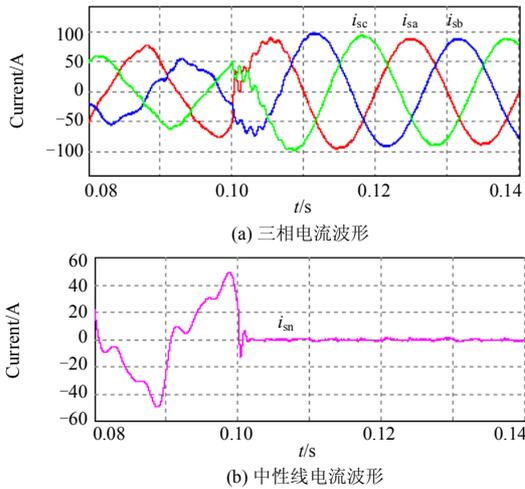


图 8 UPC 并网补偿后变压器电流波形

Fig. 8 Transformer current waveform with UPC interconnection

表 2(a)、表 2(b)表明, UPC 能有效降低负荷不对称时变压器三相电流不平衡度, 并对交流网进行无功补偿和谐波治理, 使变压器获得单位功率因数。

图 9 为 UPC 并网运行时 VSC 四个桥臂的电流波形, UPC 并网电流和变压器出口端电流共同形成了交流负荷电流, VSC 第四桥臂则为交流负荷零序电流提供了通道并阻止其流入变压器。图 10 为 UPC 并网运行时直流侧总电压  $V_d$  及正负极电压  $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$  波形,  $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$  稳态时存在误差及稳态误差大小均由  $V_{upper-allow}$ 、 $V_{lower-allow}$  大小设置所决定。图中  $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$  与参考值的偏差仅为 5.3%, 能满足负荷用电要求。

表 2 UPC 并网补偿前后变压器运行参数

Table 2 Transformer operating parameters before and after the UPC interconnection

(a) UPC 并网补偿前变压器运行参数				
参数	$i_{sa}$	$i_{sb}$	$i_{sc}$	$i_{sn}$
$A_{RMS}$	50.81	35.39	39.54	27.64
$CUD/\%$	21.24	15.56	5.65	-
$THD/\%$	8.14	12.2	9.20	-
$PF$	0.688 9	0.792 9	0.523 5	-
(b) UPC 并网补偿后变压器运行参数				
参数	$i_{sa}$	$i_{sb}$	$i_{sc}$	$i_{sn}$
$A_{RMS}$	62.82	62.40	62.65	0.64
$CUD/\%$	3.19	3.51	0.48	-
$THD/\%$	2.13	2.10	2.12	-
$PF$	0.999 83	0.999 82	0.999 87	-

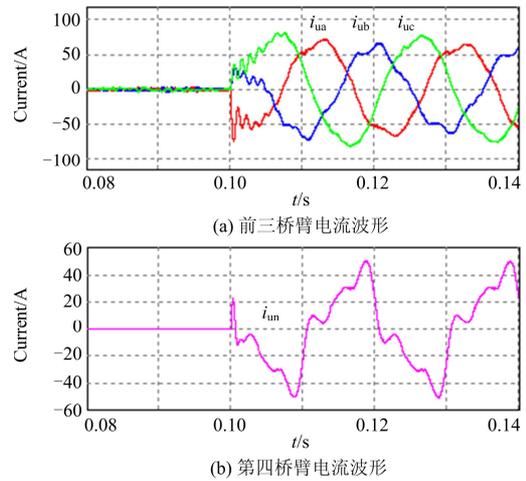


图 9 UPC 并网补偿电流波形

Fig. 9 UPC compensation current waveform

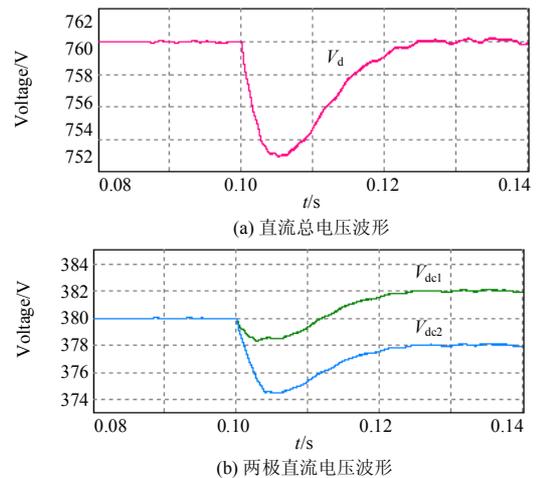


图 10 UPC 并网后直流网电压波形

Fig. 10 DC voltage waveform after UPC interconnection

为验证 UPC 在负荷扰动时的动态性能, 在  $t=0.2\text{ s}$  时增大直流负荷, 并在  $t=0.24\text{ s}$  进一步增大交流负荷, 仿真结果如图 11 所示。当直流负荷改变后, 有  $R_1$  小于  $R_2$ , 故直流负荷改变后  $V_{dc2}$  大于  $V_{dc1}$ 。表 3 为负荷增大后, 变压器  $CUD$ 、 $THD$ 、 $PF$  等参数分析。表 3 表明, 负荷扰动时, UPC 能有效地对系统电压和电流进行调节, 并快速进入稳态运行。稳态后, 变压器三相电流基本对称, 且功率因数近似为 1。直流配电网中  $V_{dc}$ 、 $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$  的稳态偏差最大不超过 1.6%, 能够满足电能质量要求。

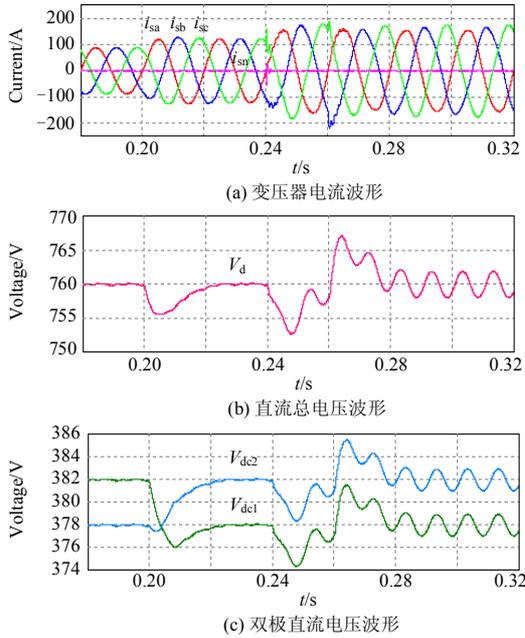


图 11 负荷改变时仿真结果

Fig. 11 Simulation results with load change

表 3 负荷改变后变压器运行参数

Table 3 Transformer operating parameters after load changing

(a) 直流负荷发生改变				
参数	$i_{sa}$	$i_{sb}$	$i_{sc}$	$i_{sn}$
$A_{RMS}$	85.96	85.38	86.63	0.62
$CUD/\%$	0.47	7.21	7.33	-
$THD/\%$	1.03	1.13	1.02	-
$PF$	0.999 9	0.999 9	0.999 9	-
(b) 交流负荷发生改变				
参数	$i_{sa}$	$i_{sb}$	$i_{sc}$	$i_{sn}$
$A_{RMS}$	113.51	115.23	119.17	0.61
$CUD/\%$	2.12	0.64	2.76	-
$THD/\%$	3.68	3.50	3.51	-
$PF$	0.999 1	0.998 4	0.999 3	-

#### 4.2 考虑 DG 并网时仿真结果

当混合配电网中含 DG 时,  $t=0.2\text{ s}$  时 DG 并网

发电, 并在  $t=0.24\text{ s}$  时, 使 DG 发电功率进一步增大, 其仿真结果如图 12 所示。相比图 8, DG 为直流网提供了部分有功功率, 减少了直流网从交流网获取的功率, UPC 并网电流和变压器电流幅值都将减小, 变压器各项参数分析如表 4 所示。因 VBC 的控制, 直流网中两极电压依然保持平衡。DG 在  $t=0.24\text{ s}$  发生扰动,  $P_{D1}$  增大 40%且  $P_{D2}$  减小 20%, DG 的总功率在扰动后增大, 故变压器三相电流幅值有所减小。此时, UPC 也能快速调节系统中的电压和电流, 使  $V_d$ 、 $V_{dc1}$  和  $V_{dc2}$  快速达到稳态要求, 并能有效地实现交流侧电能质量综合治理。

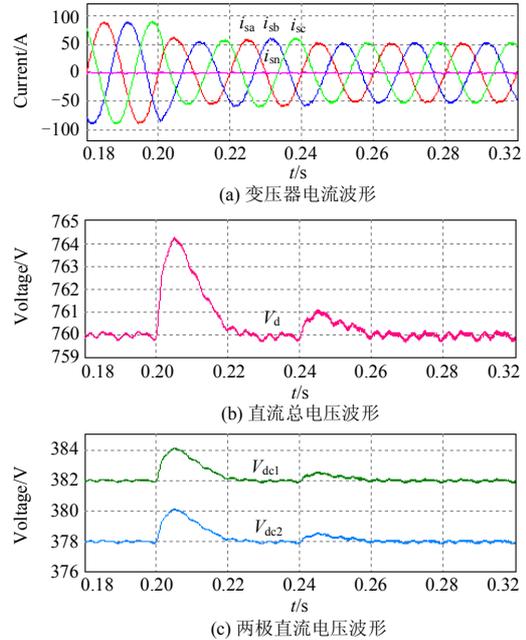


图 12 DG 并网时仿真结果

Fig. 12 Simulation results with DG interconnection

表 4 DG 并网后变压器运行参数

Table 4 Transformer operating parameters with DG interconnection

(a) DG 并网后				
参数	$i_{sa}$	$i_{sb}$	$i_{sc}$	$i_{sn}$
$A_{RMS}$	41.65	41.39	42.23	0.64
$CUD/\%$	2.63	8.86	11.32	-
$THD/\%$	2.31	2.13	2.16	-
$PF$	0.999 5	0.999 5	0.999 6	-
(b) DG 扰动后				
参数	$i_{sa}$	$i_{sb}$	$i_{sc}$	$i_{sn}$
$A_{RMS}$	37.05	37.23	36.79	0.61
$CUD/\%$	0.81	5.67	6.21	-
$THD/\%$	2.57	2.46	2.41	-
$PF$	0.999 4	0.999 5	0.999 6	-

## 5 结论

该文所提出的 UPC 结构在实现交流配电网中谐波、无功和三相负荷不平衡等问题综合治理的同时, 还具有双极三线制直流供电和 DG 直流并网功能, 避免了直流负荷或 DG 在两极之间分布不平衡所引起的两极电压偏差, 确保直流网两极电压平衡。仿真结果表明, 在混合配电网中负荷不对称、负荷发生扰动或 DG 发生扰动等多种情况下, UPC 都能有效进行交流网电能质量综合治理和直流网电压平衡控制, 既能实现三相四线制低压交流配电网中变压器出口端三相电流对称且获得单位功率因数, 又能进行可靠的直流供电和 DG 直流并网。

## 参考文献

- [1] 李春来, 杨小库. 太阳能与风能发电并网技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 158-164.
- [2] 张新昌, 周逢权. 智能电网引领智能家居及能源消费革新[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 59-67.  
ZHANG Xinchang, ZHOU Fengquan. Smart grid leads the journey to innovative smart home and energy consumption patterns[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 59-67.
- [3] 朱克平, 江道灼, 胡鹏飞. 含电动汽车充电站的新型直流配电网研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 35-41.  
ZHU Keping, JIANG Daozhuo, HU Pengfei. Study on a new type of DC distribution network containing electric vehicle charge station[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 35-41.
- [4] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.  
YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52.
- [5] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 具光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.  
YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.
- [6] 章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 VSC-HVDC 并网风电场的低电压穿越技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 93-99.  
ZHANG Xinyin, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Research on the low voltage ride-through technology of integrated wind farms based on VSC- HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 93-99.
- [7] 朱克平. 适用于分布式电源接入的直流微网研[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
ZHU Keping. Study on DC micro-grid for distributed power access[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [8] 周林, 任伟, 廖波, 等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 168-175.  
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 168-175.
- [9] 徐帅, 张建忠. 多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 39-50.  
XU Shuai, ZHANG Jianzhong. Overview of fault-tolerant techniques for multilevel voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 39-50.
- [10] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统并联补偿—结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 132-159.
- [11] 周玮阳, 虞晓阳, 金科, 等. 半桥三电平直流变换器的电容电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 56-62.  
ZHOU Weiyang, YU Xiaoyang, JIN Ke, et al. Capacitor voltage control strategy for half-bridge three-level converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 56-62.
- [12] 孙驰, 马伟明, 鲁军勇. 三相逆变器输出电压不平衡的产生机理分析及其矫正[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 57-64.  
SUN Chi, MA Weiming, LU Junyong. Analysis of the unsymmetrical output voltages distortion mechanism of three-phase inverter and its corrections[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 57-64.
- [13] 刘飞. 三相并网光伏发电系统的运行控制策略[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
LIU Fei. Research on operation control of three-phase grid connected photovoltaic power system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [14] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 49-117.

收稿日期: 2015-03-10; 修回日期: 2015-07-27

### 作者简介:

张树东(1968-), 男, 高级工程师, 研究方向为能源互联网运行与控制;

朱大为(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网技术;

刘闯(1985-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力功率变换研究. E-mail: victorliuchuang@163.com

(编辑 周金梅)