DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.15 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于级联 H 桥变流器的动态电压恢复器电压补偿控制

唐绪青，马俊鹏(中国电源学会会员)，肖先勇
(四川大学电气工程学院，成都 610065)

摘要：电压暂降是电能质量的主要问题之一，动态电压恢复器 DVR(dynamic voltage restorer)是 1 种有效的解决方案。由于传统 DVR 无法适应中压领域应用，首先介绍 1 种基于级联 H 桥多电平变流器的高压直挂式 DVR；为提高系统的响应速度及补偿精度，提出 1 种用于 DVR 交流电压补偿控制的 *dq* 轴解耦策略，同时采用基于电压补偿分量注入的载波相移脉宽调制策略，解决级联 H 桥直流侧电容电压平衡问题，保障了系统的安全性和稳定性；最后通过 MATLAB/Simulink 对所提出的 DVR 及控制算法进行建模与仿真，验证了该方法的有效性和可行性。

关键词：动态电压恢复器；级联 H 桥多电平变流器；*dq* 轴解耦控制；电容电压平衡

Voltage Compensation Control for Dynamic Voltage Restorer Based on Cascaded H-bridge Converter

TANG Xuqing, MA Junpeng, *Member*, *CPSS*, XIAO Xianyong
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Voltage sag is one of the main power quality problems, and dynamic voltage restorers (DVRs) provide an effective solution. Since the traditional DVRs are unsuitable for medium-voltage applications, a high-voltage direct-connect DVR based on a cascaded H-bridge multilevel converter is introduced. To enhance the response speed and compensation accuracy of the system, a *dq*-axis decoupling strategy for the AC voltage compensation control of DVR is proposed. Meanwhile, a carrier phase shifted pulse width modulation strategy with voltage offset injection is also employed to balance the DC-side capacitor voltage of the cascaded H-bridge, thus ensuring the safety and stability of the system. Finally, the proposed DVR and the corresponding control algorithm are modeled and simulated by MATLAB/Simulink, demonstrating the effectiveness and feasibility of the approach.

Keywords: Dynamic voltage restorer (DVR); cascaded H-bridge multilevel converter; *dq*-axis decoupling control; capacitor voltage balance

半导体制造、精密设备加工、化学工业等是配电网络中的敏感负荷，在配电网电压暂降的短暂过程中，此类负荷可能会发生生产过程中断，进而造成严重损失。将动态电压恢复器DVR(dynamic voltage restorer)配置于中高压配电网中，能够在更大范围内保证配电网电压暂降时敏感负荷的正常运行[1]。

传统 DVR 采用两电平电压源型功率变流器，由于受该类功率变流器耐压水平、电流承载能力等的限制，DVR 需要通过变压器升压来达到中压配电网的电压等级。为了降低设备成本，减小体积和重量，可以采用基于多电平变流器的 DVR 拓扑结构，省去变压器。多电平变流器的常见类型有飞跨电容多电平变流器[1-3]、二极管钳位多电平变流

收稿日期：2024-10-31；**修回日期**：2025-01-19，2025-02-11；
录用日期：2025-03-01；**网络首发日期**：2025-03-14
基金项目：中国南方电网公司科技资助项目(090000KC23020073)
This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation under the grant 090000KC23020073

器[4-5]和级联 H 桥 CHB(cascaded H-bridge)多电平变流器。其中级联 H 桥凭借其高模块化设计、更优质的输出波形、较简单的控制方法和更高的输出效率等优势而备受青睐[6-7]。

为了让 DVR 达到预期的电压补偿效果，有多种控制策略可用于生成所需的补偿电压并维持负载电压恒定。DVR 控制策略的研究主要可分为非线性控制和线性控制。由于变流器是非线性设备，非线性控制方法可以为其提供理想的控制效果，包括人工神经网络控制[8-9]、模型预测控制[10]、模糊控制[11]等。非线性控制技术的设计较为复杂，控制器开发成本较高。线性控制则具有设计和实现简单的优势，利用如比例-积分 PI(proportional-integral)控制等经典控制技术与各种反馈网络搭配便能使系统具有良好的稳态精度[12]。在级联型 DVR 的实际工程应用中，除了对交流补偿电压进行控制以外，还须对级联型逆变器的直流侧电容电压进行控制。由于各个 H 桥单元的开关状态差异及模块损耗差异，各单元的直流侧电容电压会出现不平衡。为了降低电容电压失衡导致的各子模块电压应力不均，同时保证级联型 DVR 稳定运行，需对变流器的调制方法进行改进从而控制直流侧电容电压的平衡[13]。

本文介绍了 1 种基于 CHB 多电平变流器的高压直挂式 DVR 以应用于中高压配电网电压暂降治理。采用 *dq* 解耦控制策略对 DVR 的交流补偿电压进行控制，同时采用基于电压补偿分量注入的 SPWM 算法对直流侧电容电压控制。最后利用 MATLAB/Simulink 对所提出的拓扑和控制策略进行了仿真验证。

1 CHB 多电平变流器

多电平变流器主要有飞跨电容型、二极管钳位型和级联 H 桥型。随着系统输出电压等级的升高，飞跨电容型多电平变流器需要更多的开关器件使得控制变得复杂，二极管钳位型多电平变流器则面临保持电容电压平衡较困难的问题[14-16]。与其他多电平变流器相比，CHB 的开关数量较少，所需开关频率低，降低了控制的复杂程度同时也降低了系统的开关损耗[17-18]。此外，当 CHB 用作 DVR 的逆变器时，其模块化结构使得 DVR 只需增加或减少模块数量就能灵活调整输出电压，可满足不同电网电压等级的需求。同时这种模块化结构也为 DVR 提供了冗余模块设计的可能性。当某个模块发生故障时 DVR 可快速旁路故障模块继续运行，确保 DVR 的持续可靠性[18]。

1.1 CHB 的拓扑结构

图 1 为典型的 CHB 拓扑结构，该结构由 N 个单相 H 桥单元的输出端级联组成。每个 H 桥都配备了 1 个独立的电源，可等效为 1 个与电阻串联的恒压源。每个 H 桥单元通过控制其内部的 4 个开关，能够产生 0 和 $\pm V_{dc}$ 共 3 种输出电压。通过叠加所有 H 桥单元的不同输出状态，形成阶梯状的输出波形。

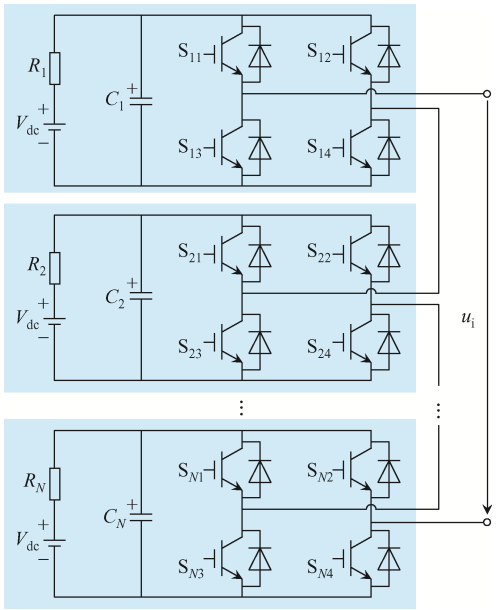


图 1 具有 *N* 个单元的 CHB 拓扑

Fig. 1 Topology of *N*-cell CHB

将第 i 个 H 桥单元的第 j 个开关 S_{ij} 的导通状态用“1”表示，关断状态用“0”表示，则第 i 个 H 桥单元的开关函数 S_i 可表示为

$$S_i = S_{i1} - S_{i3} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \qquad i = 1, 2, \cdots, N \tag{1}$$

式中，S_i取值“1”、“0”、“−1”分别表示第 i 个 H 桥正向导通、关断、反向导通。则具有 N 个单元的 CHB 的输出电压u_{o}可表示为

$$u_{\mathrm{o}} = V_{\mathrm{dc}} \sum_{i=1}^{N} S_i \tag{2}$$

式中，V_{dc}为直流电压。

1.2 CPS-SPWM

载波相移正弦脉宽调制 CPS-SPWM(carrier phase shifted-sine pulse width modulation)是 CHB 变流器最常用的调制方法之一。以两单元 CHB 为例，2 个 H 桥使用相同的调制信号u_{r}。第 1 个 H 桥单元的左、右桥臂调制信号分别为$u_{\mathrm{r1+}}$、$u_{\mathrm{r1-}}$，第 2 个 H 桥单元的左、右桥臂的调制信号分别为$u_{\mathrm{r2+}}$、$u_{\mathrm{r2-}}$，4 个桥臂的调制信号可表示为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{r1+}} = u_{\mathrm{r2+}} = \dfrac{u_{\mathrm{r}}}{2} \\ u_{\mathrm{r1-}} = u_{\mathrm{r2-}} = -\dfrac{u_{\mathrm{r}}}{2} \end{cases} \tag{3}$$

每个 H 桥单元使用不同的三角载波，如果有 N 个 H 桥单元，则每个三角载波错开π/N个相角。在两单元 CHB 中，第 1 个 H 桥单元和第 2 个 H 桥单元的载波分别为u_{c1}和u_{c2}，u_{c2}比u_{c1}滞后$\pi/2$个相位。将各桥臂的调制信号与对应的载波信号相比较生成开关信号。CPS-SPWM 的调制原理如图 2 所示。

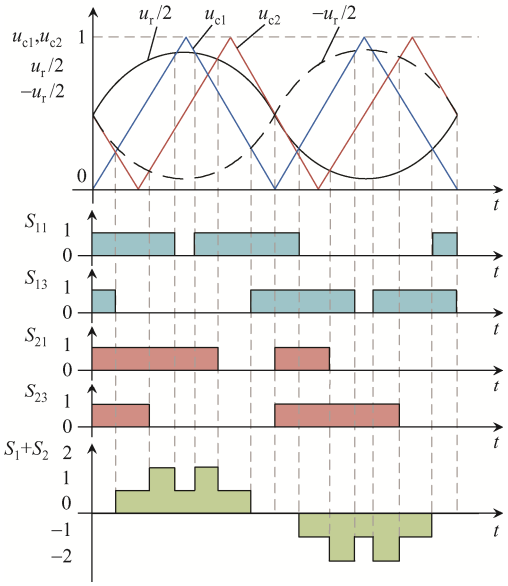


图 2　载波相移 SPWM 调制原理

Fig. 2 Modulation principle for CPS-SPWM

2　DVR 主电路结构与数学模型

图 3 为基于 CHB 的高压直挂式 DVR 系统的主电路结构，其中电网电压、DVR 输出的补偿电压和负载电压依次串联。为保证负载电压稳定在额定值，当电网电压受到扰动时，DVR 通过注入适当的电压来补偿电压凹陷。DVR 主要由直流储能电路、多电平电压源变流器、LC 滤波器和旁路开关组成。在电压暂降补偿过程中，变流器将作为逆变器工作。旁路开关与滤波电容并联，当电网电压正常时，旁路开关闭合，使 DVR 短路。除此之外，DVR 系统还包含电压暂降检测单元、控制单元和调制单元。测得的电网电压作为电压暂降检测单元的输入，当测量值偏离设定值时，电压暂降检测单元向控制单元发送信号。控制单元根据控制策略生成逆变器的调制信号，逆变器输出的电压经过 LC 滤波器滤波后注入配电网。

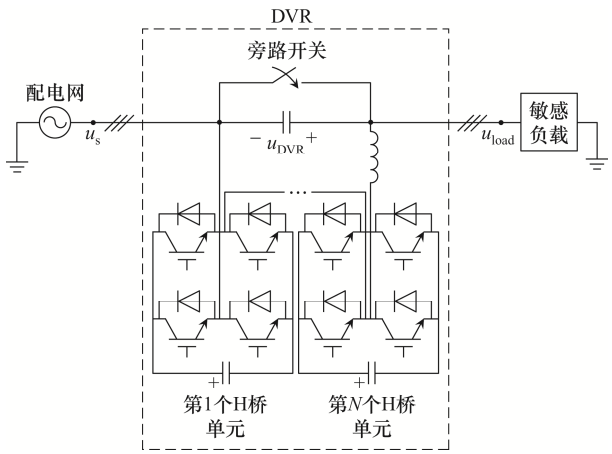


图 3　基于 CHB 的高压直挂式 DVR 系统主电路

Fig. 3 Main circuit of CHB-based high-voltage direct-connect DVR system

图 4 为上述系统的等效电路。图中：逆变器等效为 1 个受控电压源，u_{i}为其输出电压；u_C为滤波电容的电压；i_L为滤波电感的电流；u_{s}、u_{DVR}和u_{load}分别为电网电压、DVR 补偿电压和负载电压。DVR 的数学模型可表示为

$$u_{\mathrm{i}} = L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} + u_C \tag{4}$$

$$u_{\mathrm{s}}+u_{\mathrm{DVR}}=u_{\mathrm{load}} \tag{5}$$

$$u_{\mathrm{DVR}}=u_C \tag{6}$$

$$L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}=u_{\mathrm{i}}-u_C \tag{7}$$

$$C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=i_L-i_{\mathrm{load}} \tag{8}$$

式中：L 为滤波电感；C 为滤波电容；i_{load} 为负载电流，以 DVR 流向负载为正。

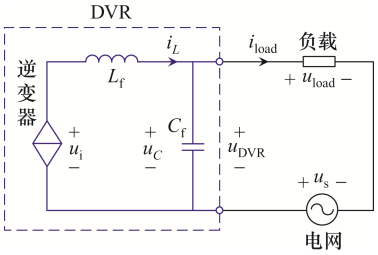


图 4 DVR 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of DVR

3 控制策略

3.1 负载电压-电感电流双闭环反馈控制策略

DVR 的控制策略需要快速响应电压暂降和精确调节补偿电压，目前负载电压-电感电流双闭环反馈控制是 1 种常见的控制方法。该策略首先将负载瞬时电压 u_{load} 与参考电压 u_{ref} 作比较得到电压偏差信号，经电压外环 PI 调节器得到电流参考信号 i_{ref}。i_{ref} 作为内环的参考值与电感瞬时电流作比较得到电流偏差信号，再由电流内环 PI 调节器生成逆变器的调制信号 u_{r}。外环负责稳态精度，内环负责快速响应，从而实现对逆变器输出的精确控制，确保补偿电压的准确性和快速性。负载电压-电感电流双闭环反馈控制框图如图5所示[19-20]。

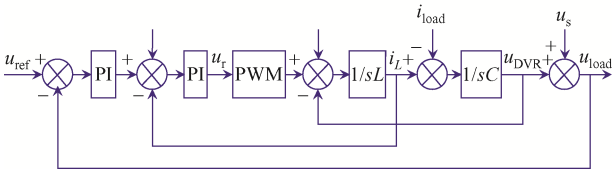


图 5 双闭环反馈控制框图[19-20]

Fig. 5 Block diagram of dual closed-loop feedback control[19-20]

3.2 *dq* 解耦控制策略

当 PI 控制器对直流系统进行控制时能实现输出信号对参考信号的跟踪，达到理想的控制目的。然而，在交流系统中，PI 控制器对高频信号的跟踪性能差，并不能满足设计要求。为了解决这个问题，一种办法是用比例谐振 PR(proportional resonant)控制器代替 PI 控制器。PR 控制器能在静止坐标系下，直接对交流信号无稳态误差跟踪。然而在大量可再生能源并网的系统中，电网频率波动时有发生，由于 PR 控制器对频率十分敏感，当基准频率发生偏移时，其性能会显著下降，导致跟踪误差增大[21-22]。另一种方法将三相交流信号通过 Clark 变换和 Park 变换，将其转换到同步旋转 *dq* 坐标系下的直流量，可以用 PI 控制器对 *dq* 轴的直流信号进行无静差控制，最后再通过 Park 反变换和 Clark 反变换，转换回 abc 坐标系下的交流量。

由于 *dq* 控制需要用到 Clark 变换和 Park 变换，所以通常用于三相系统。然而如果发生三相不平衡电压暂降时，三相 DVR 需要复杂的控制策略[23-24]。而用 3 个单相 DVR 能对各相电压进行独立灵活的控制，有效应对三相不平衡暂降的运行工况。为了在单相系统中应用 *dq* 控制，必须生成 1 个与实际信号正交的虚拟信号以进行 Clark 变换和 Park 变换。这可以通过正交信号发生器 OSG(orthogonal signal generator)来实现。产生正交信号最简单的 OSG 是将原始单相信号延迟 $T/4$(1/4 周期)。在 $\alpha\beta$ 坐标系中，DVR 的状态方程可表示为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{i},\alpha}=L\dfrac{\mathrm{d}i_{L,\alpha}}{\mathrm{d}t}-u_{C,\alpha} \\ u_{\mathrm{i},\beta}=L\dfrac{\mathrm{d}i_{L,\beta}}{\mathrm{d}t}-u_{C,\beta} \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} i_{L,\alpha}=C\dfrac{\mathrm{d}u_{C,\alpha}}{\mathrm{d}t}-i_{\mathrm{load},\alpha} \\ i_{L,\beta}=C\dfrac{\mathrm{d}u_{C,\beta}}{\mathrm{d}t}-i_{\mathrm{load},\beta} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$u_{\mathrm{i},\alpha}$ 为逆变器输出电压；$i_{L,\alpha}$ 为滤波电感电流；$u_{C,\alpha}$ 为滤波电容电压；$i_{\mathrm{load},\alpha}$ 为负载电流；$u_{\mathrm{i},\beta}$、$i_{L,\alpha}$ 和 $u_{C,\alpha}$ 分别是对应信号延迟 $T/4$ 得到的虚拟正交信号。

分别对式(9)和式(10)作 Park 变换，即可得到 dq 坐标系下的 DVR 状态方程为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{i},d} = L\dfrac{\mathrm{d}i_{L,d}}{\mathrm{d}t} - \omega L i_{L,q} - u_{C,d} \\ u_{\mathrm{i},q} = L\dfrac{\mathrm{d}i_{L,q}}{\mathrm{d}t} + \omega L i_{L,d} - u_{C,q} \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} i_{L,d} = C\dfrac{\mathrm{d}u_{C,d}}{\mathrm{d}t} - \omega C u_{C,q} - i_{\mathrm{load},d} \\ i_{L,q} = C\dfrac{\mathrm{d}u_{C,q}}{\mathrm{d}t} + \omega C u_{C,d} - i_{\mathrm{load},q} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$u_{\mathrm{i},d}$、$u_{\mathrm{i},q}$分别为逆变器输出电压的 d、q 轴分量；$i_{L,d}$、$i_{L,q}$分别为电感电流的 d、q 轴分量；$u_{C,d}$、$u_{C,q}$分别为电容电压的 d、q 轴分量；$i_{\mathrm{load},d}$、$i_{\mathrm{load},q}$分别为负载电流的 d、q 轴分量；ω 为电网电压角频率，由锁相环锁相得到。

由式(11)和式(12)可以看出，无论是电容电压还是电感电流，其 d 轴分量和 q 轴分量均相互耦合。为了能独立控制 d 轴分量和 q 轴分量，需要根据其耦合关系进行解耦控制。dq 轴解耦控制框图如图 6 所示。

控制策略的根本目标是保证 DVR 补偿电压注入到电网后，负载电压能维持恒定。由于 DVR 是通过滤波电容串联于电网，滤波电容电压即 DVR 补偿电压。所以控制器需要根据滤波电容实际电压

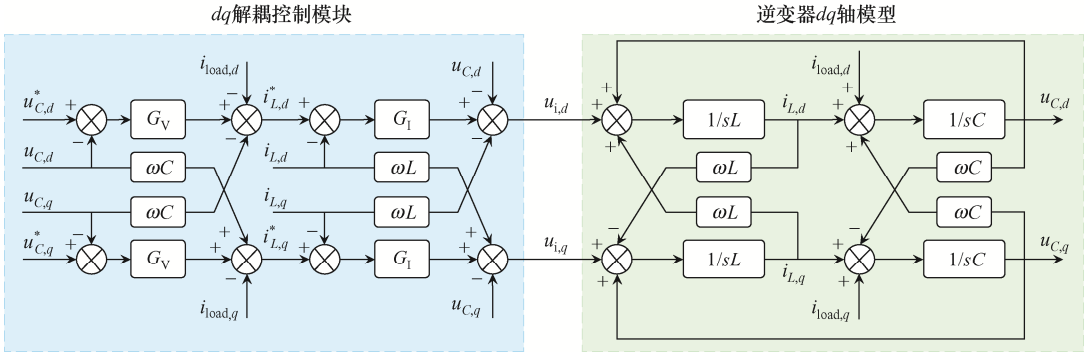


图 6　*dq* 轴解耦控制框图

Fig. 6 Block diagram of *dq*-axis decoupling control

与滤波电容电压参考值的误差来生成逆变器的参考电压信号，其中滤波电容电压参考值即 DVR 补偿电压参考值。滤波电容电压参考值 $u^*_{C,d}$ 和 $u^*_{C,q}$ 的计算式分别为

$$\begin{cases} u^*_{C,d} = u_{\mathrm{load},d} - u_{\mathrm{s},d} \\ u^*_{C,q} = u_{\mathrm{load},q} - u_{\mathrm{s},q} \end{cases} \tag{13}$$

式中，$u_{\mathrm{s},d}$、$u_{\mathrm{s},q}$和$u_{\mathrm{load},d}$、$u_{\mathrm{load},q}$分别为电网电压和负载电压额定值经 Clark 变换和 Park 变换后得到的 d、q 轴分量。

3.3　CPSPWM-VOI 直流电容电压平衡控制策略

在 CHB 中，由于每个级联单元的器件参数差异、开关信号不同步、损耗差异等原因会导致直流侧电容电压不平衡，从而导致各级联单元间的功率不平衡，威胁系统的安全稳定性[25]。为了避免这一问题，基于电压补偿分量注入的载波相移脉冲宽度调制 CPSPWM-VOI(CPSPWM with voltage offset injection)算法可改变各级联单元中电容的充放电过程，从而使 CHB 的直流侧电容电压达到平衡[26]。

以两单元 CHB 为例，根据式(1)可用组合(S_1S_2)来表示同一时刻 2 个 H 桥的通断序列，得到所有开关序列及各个 H 桥单元的导通状态见表 1。

表 1　通断序列及各单元导通状态

Tab. 1 Switching sequence and conduction state of each cell

(S_1S_2)	(00)	(01)	(10)	(11)	(0−1)	(−10)	(−1−1)
H_1	关断	关断	正向导通	正向导通	关断	反向导通	反向导通
H_2	关断	正向导通	关断	正向导通	反向导通	关断	反向导通

在(00)、(11)和(−1−1)序列下，H_1 和 H_2 的通断状态相同，电容 C_1 和 C_2 的充放电状态也相同。在(01)、(10)、(0−1)和(−10)序列下 H_1 和 H_2 的通断状态不同，C_1 和 C_2 的充放电状态也不同。例如，

在(01)序列时，H_1 关断但是 H_2 正向导通，此时仅有 C_2 进行放电。将(01)、(10)和(0−1)、(−10)称为 2 对冗余状态。

设开关周期为 T_s，(S_1S_2)对应序列的作用时长为 $T_{(S_1S_2)}$。因传统的 CPS-SPWM 调制具有对称性，所以 2 对冗余状态的作用时长分别相等，即 $T_{(10)}=T_{(01)}=T_{(0-1)}=T_{(-10)}=u_rT_s$ $(0<u_r<1)$。若向调制波 u_r 注入适量的电压补偿分量 u_v，就能改变冗余状态的作用时间，从而分别改变 C_1 和 C_2 的充放电过程。注入补偿分量后的 2 个新调制信号可分别表示为

$$\begin{cases} u_{r1}=\dfrac{u_r}{2}-u_v \\ u_{r2}=\dfrac{u_r}{2}+u_v \end{cases} \tag{14}$$

对应的各桥臂调制信号为

$$\begin{cases} u_{r1+}=\dfrac{u_r}{2}-u_v \\ u_{r1-}=-\dfrac{u_r}{2}+u_v \\ u_{r2+}=\dfrac{u_r}{2}+u_v \\ u_{r2-}=-\dfrac{u_r}{2}-u_v \end{cases} \tag{15}$$

图 7 为 CPSPWM-VOI 算法与传统 CPSPWM 在 $u_r>0$、$u_v>0$ 时的对比。图中，(S_1S_2) 表示补偿分量注入前的开关状态，$(S_1S_2)'$ 表示补偿分量注入后的开关状态。

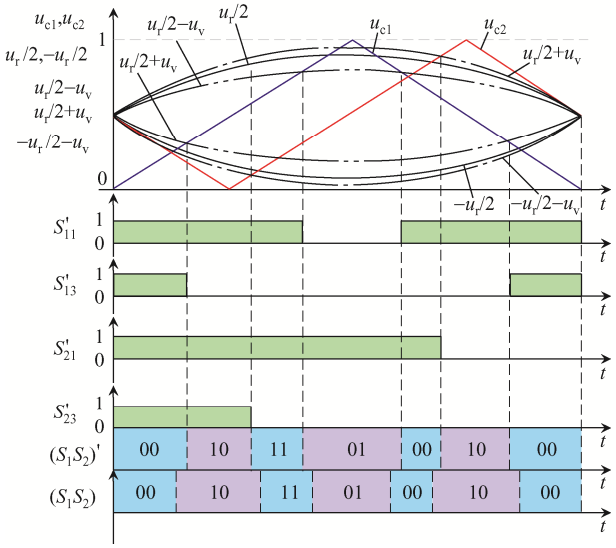


图 7 CPSPWM-VOI 算法与传统 CPSPWM 的对比

Fig. 7 Comparative between CPSPWM-VOI algorithm and traditional CPSPWM

注入补偿分量后，冗余状态的时长可表示为

$$\begin{cases} T_{(10)}=\left(\dfrac{u_r}{2}+u_v\right)T_s \\ T_{(10)}=\left(\dfrac{u_r}{2}-u_v\right)T_s \end{cases} \tag{16}$$

状态(10)的持续时间增加了 u_vT_s，而状态(01)的持续时间减少了 u_vT_s，表明 C_1 的放电时间增加了 u_vT_s，而 C_2 的放电时间减少了 u_vT_s。同理，当 $u_v<0$ 时，状态(−10)的持续时间减少 u_vT_s，而状态(0−1)的持续时间增加 u_vT_s，即 C_1 的充电时间减少 u_vT_s，而 C_2 的充电时间增加 u_vT_s。对于同一个电容，增加放电时间并减少充电时间等效于减小该电容的电压；减少放电时间并增加充电时间则等效于增加该电容的电压。通过这种方式分别改变 2 个电容器的充、放电时间，可以实现 2 个电容器之间的电压平衡。用 CPSPWM-VOI 算法调节第 i 个电容电压 u_{C_i} 的流程如图 8 所示。其中 u_v 的正负可表示为

$$u_v=-\mathrm{sgn}(i_{load})\cdot\Delta u \tag{17}$$

式中，Δu 为第 i 个电容电压 u_i 与所有级联模块的电容电压平均值之差。

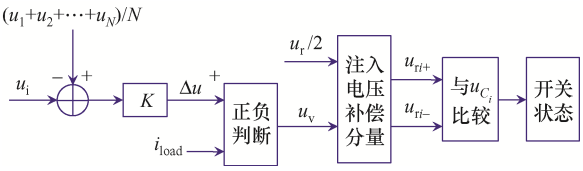


图 8 CPSPWM-VOI 算法的流程

Fig. 8 Flow chart of CPSPWM-VOI algorithm

4 仿真验证

为了验证所提出方案的可行性和有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建基于两单元 CHB 的高压直挂式 DVR 模型，并分别对所提出的交流侧 dq 解耦控制和直流侧 CPSPWM-VOI 电容电压平衡控制进行仿真验证。系统参数设置见表 2。

表 2　仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	数值
电网电压(线电压)/kV	10
负载功率/MW	1
负载额定电压(线电压)/kV	10
滤波电感 L_f/mH	3
滤波电容 C_f/μF	7
开关频率/kHz	5
直流电容 C_1/mF	10
直流电容 C_2/mF	10
内阻 R_1/Ω	1
内阻 R_2/Ω	6
直流电压 V_1/kV	5
直流电压 V_2/kV	5

4.1 *dq* 解耦控制策略的仿真验证

对本文所提出的 *dq* 解耦控制和传统负载电压-电感电流双闭环控制进行仿真。电网电压在仿真时间的前 0.75 s 保持正常运行，在仿真时间 0.75 s 发生 50%的电压暂降，且在 1.00 s 时电网电压发生第 2 次暂降至 30%，最后在 1.25 s 电压暂降结束。电网电压的电压暂降波形如图 9 所示。图 10、图 11

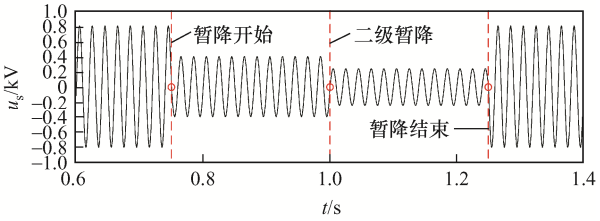


图 9　电网电压暂降波形

Fig. 9 Voltage sag waveform of power grid

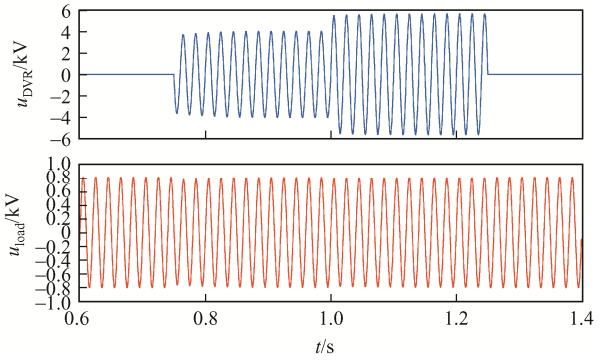


图 10　*dq* 轴控制的 DVR 补偿与负载电压波形

Fig. 10 DVR compensation and load voltage waveforms under *dq*-axis control

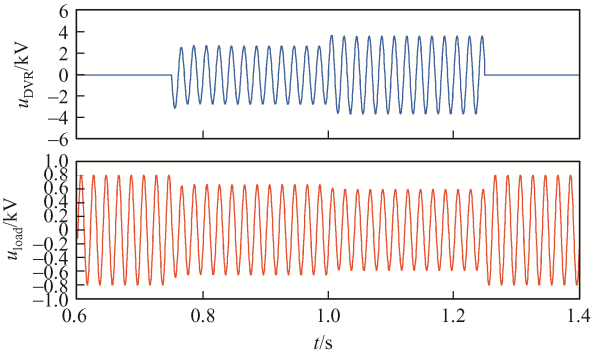


图 11　双闭环反馈控制的 DVR 补偿与负载电压波形

Fig. 11 DVR compensation and load voltage waveforms under dual closed-loop feedback control

分别为 DVR 采用 *dq* 解耦控制、采用传统负载电压-电感电流双闭环控制的补偿电压和负载电压波形。

通过仿真验证，2 种控制策略下 DVR 的性能表现存在显著差异。采用 *dq* 解耦控制的 DVR 在电网电压发生暂降时，展现出更快的动态响应速度和更高的稳态补偿精度，有效补偿负载电压至暂降前水平。当电网电压发生二次暂降时 *dq* 解耦控制展现出了更强的动态响应能力，能够快速调整补偿电压以维持负载电压的稳定性；相比之下，传统负载电压-电感电流双闭环控制稳态误差较大，补偿效果仅能在一定程度上改善电压波形，无法完全恢复至理想状态，且应对电压再次突变的能力较差。

4.2 CPSPWM-VOI 直流电容电压平衡控制策略

对所提出的 CPSPWM-VOI 直流侧电容电压平衡控制策略在 MATLAB/Simulink 进行仿真验证。在初始状态下，直流电容 C_1、C_2 的电压约为 4.97、4.85 kV。在仿真时间 1.0 s 时注入电压补偿分量，经 0.1 s 后 2 个电容器之间的电压在 4.96 kV 左右达到平衡。电容 C_1 的电压 u_1 和电容器 C_2 的电压 u_2 的曲线如图 12 所示。

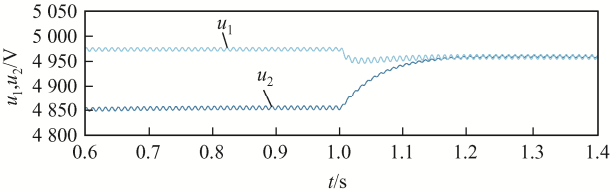


图 12　CHB 直流侧电容电压仿真波形

Fig. 12 Simulation waveforms of capacitor voltage on DC-side of CHB

为验证多个 H 桥单元级联时该方法的有效性，进行 3 单元 CHB 的仿真研究。设置直流电压 V_1、V_2、V_3 均为 4 000 V，内阻 R_1、R_2、R_3 分别为 1、3、6 Ω。在初始状态下，直流电容 C_1、C_2、C_3 的电压 u_1、u_2、u_3 约为 3.98、3.94、3.88 kV。在仿真时间 1.0 s 时注入了电压补偿分量，经 0.1 s 后 3 个电容器之间的电压在 3.96 kV 左右达到平衡，验证了该方法的可行性和拓展性。电容电压 u_1、u_2、u_3 曲线如图 13 所示。

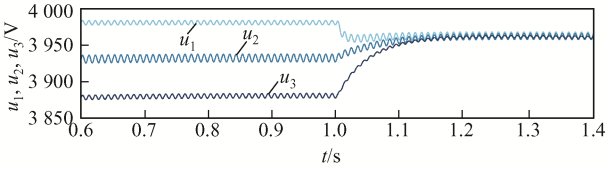


图 13 3 单元 CHB 直流侧电容电压仿真波形

Fig. 13 Simulation waveforms of capacitor voltage on DC-side of 3-cell CHB

5 结论

本文提出了 1 种基于 CHB 的高压直挂式 DVR，适用于中高压配电网的电压暂降治理。本文从 CHB 的拓扑结构、调制方法、DVR 控制策略 3 方面进行了研究。将 *dq* 解耦控制策略用于 DVR 的交流补偿电压控制，以保证 DVR 的补偿精度，提高响应速度。同时将 CPSPWM-VOI 算法用于控制 CHB 的直流电容电压平衡，提高了系统运行的安全性也减少了系统功率损耗。所提出的 DVR 方案可迅速补偿配电网发生的电压暂降，保护敏感负载的电压水平。方案的可行性和有效性通过仿真得到了验证。

参考文献：

[1] 郭姚超, 胡志军, 刘智强, 等. 动态电压恢复器在电能质量监测中的应用研究[J]. 环境技术, 2024, 42(9): 194-201.
Yaochao Guo, Zhijun Hu, Zhiqiang Liu, et al. Study on the application of dynamic voltage restorer in power quality monitoring [J]. Environmental Technology, 2024, 42(09): 194-201. (in Chinese)

[2] 陈少俊, 王其林, 童斯琦, 等. 基于开关电容和飞跨电容的十七电平逆变器[J]. 广东电力, 2024, 37(7): 78-87.
Chen Shaojun, Wang Qilin, Tong Siqi, et al. Seventeen-level inverter based on switched-capacitor and flying-capacitor [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 78-87. (in Chinese)

[3] Tang Yi, Qin Zian, Blaabjerg F, et al. DQ reference frame modeling and control of single-phase active power decoupling circuits [C]// 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Charlotte, NC, USA, 2015: 2725-2732.

[4] Arya P, Jain P. Assesment of DVR using conventional VSI and NPC-MLI to mitigate voltage sag/swell [C]// 2022 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). BHOPAL, India, 2022: 1-6.

[5] 方丽. 水利设备中二极管钳位型五电平逆变器优化均压算法研究[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(8): 56-61.
Fang Li. Research on optimal voltage equalization algorithm of diode clamp five-level inverter in water conservancy equipments [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(8): 56-61. (in Chinese)

[6] Zhao Yuehang, Yi Hao, Zhang Ruitao, et al. Design and research of a 10 kV dynamic voltage restorer based on cascaded H-bridge and supercapacitors [C]// 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Harbin, China, 2024: 4838-4845.

[7] Deshmukh G, Chaturvedi P, Rajderkar V. Analysis of cascaded H-bridge multilevel inverter [C]// 2022 International Conference on Futuristic Technologies (INCOFT). Belgaum, India, 2022: 1-6.

[8] Kalim Dhalayat A A, Hasabe R P. Dynamic voltage restorer for power quality enhancement with improved efficiency using artificial neural networks [C]// 2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT). Hubli, India, 2022: 1-7.

[9] Reddy N V K, Reddy R S, Vikram S M, et al. Voltage sag compensation with DVR based on machine learning controller [C]// 2022 International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC). Salem, India, 2022: 508-514.

[10] 高嘉迪, 何昊洋, 俱世豪. 一种采样模型预测控制的动态

电压恢复器控制方法[J]. 电工电气, 2023(3): 25-29, 70.
Gao Jiadi, He Haoyang, Ju Shihao. A control method of dynamic voltage restorer based on sampling model predictive control [J]. Electrotechnics Electric, 2023(3): 25-29, 70. (in Chinese)

[11] Alipour E, SeyedShenava S. Optimal fuzzy-based controller for DVR to improve power quality considering various fault types [C]// 2024 11th Iranian Conference on Renewable Energy and Distribution Generation (ICREDG). Yazd, Iran, Islamic Republic of, 2024: 1-8.

[12] 王振跃, 吴朝俊, 杨宁宁. 基于光伏储能的 DVR 分数阶 PI 控制策略[J]. 分布式能源, 2023, 8(4): 11-19.
Wang Zhenyue, Wu Chaojun, Yang Ningning. Fractional PI control strategy of DVR based on photovoltaic energy storage [J]. Distributed Energy, 2023, 8(4): 11-19. (in Chinese)

[13] 胡世勇, 邹海荣, 唐滢松. 级联 H 桥整流器电容电压平衡控制策略研究[J]. 电工技术, 2018(18): 147-148, 159.
Hu Shiyong, Zou Hairong, Tang Yingsong. Research on capacitor voltage balance control strategy of cascaded H-bridge rectifier [J]. Electric Engineering, 2018(18): 147-148, 159. (in Chinese)

[14] 杨文强. GaN 飞跨电容三电平逆变器调制方法与电容均压策略研究[D]. 天津：天津理工大学, 2024.
Yang Wenqiang. Research on modulation and capacitor voltage sharing strategy of GaN flying capacitor three-level inverter [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024. (in Chinese)

[15] Khoshkbar-Sadigh A, Farzamkia S, Dargahi V. Dynamic voltage restorer controlled with energy minimized compensation method based on double flying capacitor multicell inverter [C]// 2020 Clemson University Power Systems Conference (PSC). Clemson, SC, USA, 2020: 1-5.

[16] Arya P, Jain P. Assesment of DVR using conventional VSI and NPC-MLI to mitigate voltage sag/swell [C]// 2022 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). BHOPAL, India, 2022: 1-6.

[17] Bharadwaj V, Panda S, Kundu S, et al. Seven level CHB multilevel inverter based STATCOM using decoupled control & DC voltage balancing [C]// 2023 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE). Kolkata, India, 2023: 1-6.

[18] 孙熙晨, 林旭梅, 张明鹏. 单相有源前端级联 H 桥逆变器故障容错控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 11-19, 33.
Sun Xichen, Lin Xumei, Zhang Mingpeng. Fault-tolerant control of single-phase active front-end cascaded H-bridge inverter [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 11-19, 33. (in Chinese)

[19] 柯鑫. 动态电压恢复器电压跌落检测算法与控制技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
Ke Xin. Research on voltage drop detection algorithm and control technology of dynamic voltage restorer [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2024. (in Chinese)

[20] 高嘉迪.动态电压恢复器检测和控制方法研究[D].西安：西安石油大学, 2023.
Gao Jiadi. Dynamic voltage restorer detection and control method research [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023. (in Chinese)

[21] 许加柱, 陈振海, 夏静, 等. 并联型模块化级联超级电容多目标电能质量治理研究[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 157-164.
Xu Jiazhu, Chen Zhenhai, Xia Jing, et al. Research on multi-target power quality management of parallel modular multi-level cascaded super-capacitors [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 157-164. (in Chinese)

[22] Ijaz M, Nazir R, Alhussein M, et al. Digital resonant control of power converters under variable grid frequency conditions [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1272329.

[23] Rahman S A, Kassahun H E, Tefera B A, et al. Voltage sag, swell, and interruption compensation using DVR based on energy storage device [J]. IEEE Access, 2024, 12: 50834-50840.

[24] Tasre M B, Dhole G M, Jadhao S S, et al. DVR control for balanced and unbalanced sag mitigation [J]. IJTPE Journal, 2016, 8: 40-45.

[25] 张海洋, 王明渝. 级联式电力电子变压器的电压平衡控制策略[J]. 现代电力, 2020, 37(1): 98-103.
Zhang Haiyang, Wang Mingyu. Voltage balance control

strategy for a cascaded H-bridge converter-based power electronic transformer [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1): 98-103. (in Chinese)

[26] 王顺亮, 宋文胜, 冯晓云. 基于电压补偿分量注入的单相级联 H 桥整流器载波调制与电容电压平衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3117-3123.
Wang Shunliang, Song Wensheng, Feng Xiaoyun. Carrier-based modulation and capacitor voltage balance control method with voltage offset injection of single phase cascaded H-bridge rectifiers [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3117-3123. (in Chinese)



唐绪青

作者简介：

唐绪青(2001—)，男，硕士。研究方向：电能质量。E-mail：tangxuqing897@163.com。

马俊鹏(1990—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：并网变换器建模与控制。E-mail：jma@scu.edu.cn。

肖先勇(1968—)，男，博士，教授。研究方向：电能质量与优质电力，智能电网。E-mail：xiaoxianyong@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)



来源：中国科学技术协会