# 基于超级电容储能系统的动态电压恢复器研究

易桂平，胡仁杰
（东南大学 电气工程学院，江苏 南京 210096）

**摘要：** 在建立基于等效电路的超级电容器储能(SCES)系统的数学模型基础上，设计了一种超级电容器储能的动态电压恢复器(DVR)。该 DVR 以超级电容器为直流侧储能单元，采用非隔离型 Buck-Boost 双向 DC/DC 变换器进行双闭环功率前馈控制，采用双向电压源型 DC/AC 变换器进行解耦和前馈补偿控制。根据 SCES 的特性，确定了系统的基本运行原理，即当电源电压暂降时，通过调节 DVR 输出的有功功率和无功功率来维持负载电压幅值和相位的稳定。仿真实验结果验证了该 DVR 拓扑结构及其控制策略的正确性和有效性。

**关键词：** 动态电压恢复器；控制；超级电容器；储能
**中图分类号：** TM 761　　**文献标识码：** A　　DOI：10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.004

## 0 引言

近年来，电能质量问题越来越受到人们的关注，用户对供电质量的要求也越来越高。电能质量的异常通常表现为幅值或波形的异常，如电压暂降、三相不平衡、电压波动与闪变、谐波及频率变动等。其中电压暂降是目前最为普遍、危害最大的动态电能质量问题，抑制电压暂降的装置主要有并联型的配电静止无功补偿器(D-STATCOM)及串联型的动态电压恢复器(DVR)[1-2]。这些补偿装置可以补偿无功功率，但不能补偿有功功率，补偿性能易受到限制。

目前普遍采用的储能技术有电池、燃料电池、飞轮储能、超导储能等，其中电池储能历史悠久、技术成熟稳定、应用也相当地广泛，但存在工作环境要求高、运行维护复杂、使用寿命短等缺点。超级电容器是近几年来出现的一种新型储能技术，与电池储能相比具有许多显著的优势，因其具有循环使用寿命长、功率密度高、响应时间快、充放电效率高、控制简单和无污染等众多优点而被广泛地应用于大功率短期的充放电场合下。在电网电压波动的情况下，超级储能电容器可通过释放或吸收负荷端的有功功率来改善其电压质量。

本文对采用超级电容储能元件的 DVR 进行了分析，建立了基于等效电路的超级电容储能系统模型，提出了双向 DC/DC 变换器和双向 DC/AC 变换器的相关控制策略，仿真实验结果验证了该恢复器拓扑结构及其控制策略的有效性和正确性。

## 1 DVR 对电压暂降的补偿分析

超级电容器储能 DVR 的主电路如图 1 所示[3-4]，其主要由超级电容器组、电压型双向 DC/DC 变换器、电压型双向 DC/AC 变换器和控制装置组成。

当电网电压 $\boldsymbol{U}_s$ 发生暂降时，DVR 通过变压器

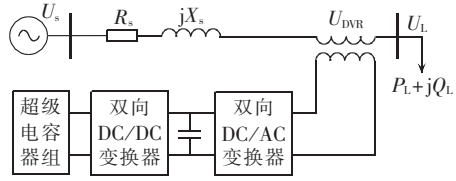


**图 1 超级电容器储能动态电压恢复器的主电路**
Fig.1 Main circuit of DVR based on SCES

串联在电路中，同时产生补偿电压 $\boldsymbol{U}_{DVR}$ 来保持负荷端电压 $\boldsymbol{U}_L$ 的幅值不变。由图 1 可得：

$$\boldsymbol{U}_{DVR}=\boldsymbol{U}_L+\boldsymbol{Z}_s\boldsymbol{I}_L-\boldsymbol{U}_s \tag{1}$$

$$\boldsymbol{I}_L=\left(\frac{P_L+jQ_L}{\boldsymbol{U}_L}\right)^* \tag{2}$$

设 $\boldsymbol{U}_L$ 的幅角为 0°，则将式(1)展开后得：

$$U_{DVR}\angle\alpha=U_L\angle 0°+Z_sI_L\angle(\beta-\phi)-U_s\angle\delta \tag{3}$$

其中，$U_s$、$U_{DVR}$、$U_L$、$I_L$ 分别为 $\boldsymbol{U}_s$、$\boldsymbol{U}_{DVR}$、$\boldsymbol{U}_L$、$\boldsymbol{I}_L$ 的幅值；$Z_s$ 为线路阻抗；$\alpha$ 为 $\boldsymbol{U}_{DVR}$ 的幅角；$\beta$ 为 $Z_s$ 的幅角；$\delta$ 为 $\boldsymbol{U}_s$ 的幅角；$\phi=\arctan(Q_L/P_L)$。则 DVR 的容量为：

$$\boldsymbol{S}_{DVR}=\boldsymbol{U}_{DVR}\boldsymbol{I}_L^* \tag{4}$$

根据式(3)可画出 DVR 的对应相量图，如图 2 所示。

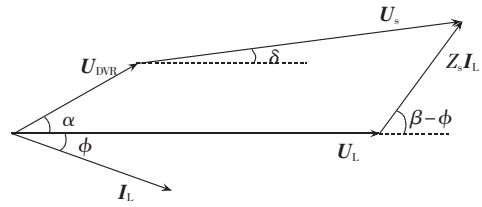


**图 2 DVR 的相量图**
Fig.2 Phasor diagram of DVR

此 DVR 所补偿的电压幅值大小为：

$$U_{DVR}^2=U_L^2+U_s^2+Z_s^2I_L^2+2U_LZ_sI_L\cos(\beta-\phi)-2U_sZ_sI_L\cos(\beta-\phi-\delta)-2U_LU_s\cos\delta \tag{5}$$

在负荷电流给定的条件下，要使得 DVR 的容量最小，电压应取最小值，此时应该满足：

$$\partial U_{DVR}^2/\partial\delta=0 \tag{6}$$

收稿日期：2012-10-14；修回日期：2013-10-03

求解式(6)得：

$$\delta=\arctan\frac{Z_sI_L\sin(\beta-\phi)}{U_L+Z_sI_L\cos(\beta-\phi)} \tag{7}$$

则依据已知条件可以计算出 $\boldsymbol{U}_s$ 的幅角 $\delta$ 值，再将得出的 $\delta$ 值分别代入式(3)和式(4)，就可得到串联型DVR的最小容量和最小注入电压。

假设没有超级电容器储能单元，DVR只补偿无功功率，则此时应该满足：

$$\alpha=\pi/2-\phi \tag{8}$$

代入式(3)可得：

$$\delta=\arccos\frac{U_L\cos\phi+Z_sI_L\cos\beta}{U_s}-\phi \tag{9}$$

要满足等式(9)，就必须同时满足如下不等式：

$$U_s\geqslant U_L\cos\phi+Z_sI_L\cos\beta \tag{10}$$

从以上分析可以看出采用纯无功方式不一定能补偿电压暂降，因此，补偿方案应将逆变器等主回路装置的容量和储能系统的容量有机地结合起来，采用超级电容作为DVR储能单元，可在经济和技术上都获得比较合理的方案[5-8]。当电源电压发生暂降时，储能单元经升压逆变器输出有功功率；当电源电压出现骤升时，储能单元吸收整流器降压后的有功功率，来维持负荷电压的稳定。

## 2 DVR的数学模型

### 2.1 双向DC/DC变换器的数学模型

本文采用的非隔离型Buck-Boost双向DC/DC变换器结构见图3[9-11]。

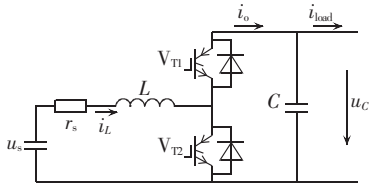


图3 非隔离型Buck-Boost双向DC/DC变换器

Fig.3 Non-isolated bi-directional Buck-Boost DC/DC converter

设 $V_{T1}$ 的导通时间为 $d$，以理想电容电压 $u_C$ 和电感电流 $i_L$ 作为状态变量，采用状态空间平均法，建立相应的状态方程如下：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=\dfrac{d}{C}i_L-\dfrac{i_{load}}{C}\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}=\dfrac{r_s}{L}i_L-\dfrac{d}{L}u_C+\dfrac{u_s}{L}\end{cases} \tag{11}$$

则在稳态工作点 $(u_{C0},i_{L0},i_{load0},d_0,u_{s0})$ 处有：

$$\begin{cases}d_0i_{L0}=i_{load0}\\-r_si_{L0}-d_0u_{C0}+u_{s0}=0\end{cases} \tag{12}$$

在稳态工作点处施加扰动：$u_C=u_{C0}+\Delta u_C$，$u_s=u_{s0}+\Delta u_s$，$i_{load}=i_{load0}+\Delta i_{load}$，$i_L=i_{L0}+\Delta i_L$，$d=d_0+\Delta d$，忽略二阶分量，线性化后可得到相应的小信号模型：

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{u}_C\\ \Delta\dot{i}_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \dfrac{d_0}{C}\\ \dfrac{-d_0}{L} & \dfrac{-r_s}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta u_C\\ \Delta i_L\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{i_{L0}}{C}\\ \dfrac{-u_{C0}}{L}\end{bmatrix}\Delta d+\begin{bmatrix}\dfrac{-1}{C} & 0\\ 0 & \dfrac{1}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_{load}\\ \Delta u_s\end{bmatrix} \tag{13}$$

取电容电压 $u_C$、电感电流 $i_L$ 与输出电流 $i_o$ 为输出量，则可得系统的输出方程：

$$\begin{bmatrix}u_C\\ i_L\\ i_o\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\\ 0 & d\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_C\\ i_L\end{bmatrix} \tag{14}$$

线性化后可得：

$$\begin{bmatrix}\Delta u_C\\ \Delta i_L\\ \Delta i_o\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\\ 0 & d_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta u_C\\ \Delta i_L\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ i_{L0}\end{bmatrix}\Delta d \tag{15}$$

由式(13)和式(15)建立Buck-Boost双向变换器，系统框图如图4所示[7]。

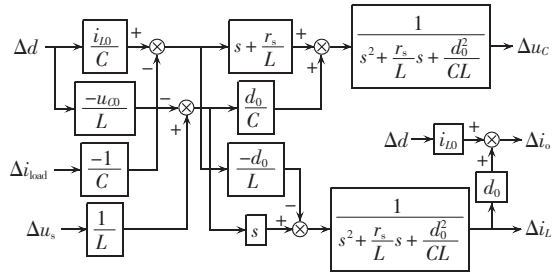


图4 Buck-Boost双向变换器系统框图

Fig.4 Block diagram of bi-directional Buck-Boost converter system

### 2.2 双向DC/AC变换器的数学模型

双向DC/AC变换器主电路结构如图5所示[7-14]，直流电压 $U_d$ 经过PWM电路后产生逆变桥的输出电压 $U_i$，$U_i$ 通过二阶 $LC$ 滤波器得到正弦波输出电压 $U_{C'}$，即DC/AC变换器的输出，$L'$ 和 $r$ 分别为滤波电感及其等效阻抗，$C'$ 为滤波电容。

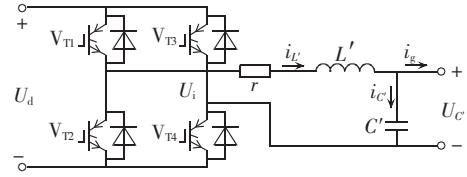


图5 双向DC/AC变换器主电路

Fig.5 Main circuit of bi-directional DC/AC converter

对于图5的全桥DC/AC变换器，忽略逆变桥的滞后作用，将其看作比例环节，根据 $LC$ 滤波器可以写出以 $[U_{C'},I_{L'}]^T$ 为状态变量的状态方程：

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{C'}\\ \dot{I}_{L'}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \dfrac{1}{C'}\\ -\dfrac{1}{L'} & -\dfrac{r}{L'}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U_{C'}\\ I_{L'}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{1}{L'}\end{bmatrix}U_i \tag{16}$$

其中，$U_{C'}$为电容电压，$I_{L'}$为电感电流，$U_i$ 为逆变桥输出电压，其值为：

$$U_i = U_d(2S^* - 1) \tag{17}$$

其中，$S^*$ 是开关函数，当 $V_{T1}$、$V_{T4}$ 管导通，$V_{T2}$、$V_{T3}$ 管关断时，$S^*=1$；反之，$S^*=0$。

显然，由于开关器件具有开通和关断 2 种状态，导致方程非线性，但是在 2 种状态期间，方程又是线性的，所以可以用分段线性化来进行系统建模。这种方法在数字控制中应用十分广泛，而且利用计算机的数值计算功能可以对系统进行仿真，它可以精确地模拟电路的工作过程，借助可视化软件可以对结果做出直观的分析。但是，在某些场合，尤其是频域分析中，分段线性化会使主电路的传递函数复杂化，增加系统分析和设计的难度。因此，系统建模通常采用状态空间平均法，它是基于输出频率与响应频率远小于开关频率的情况，在一个开关周期内，用变量的平均值代替其瞬时值，从而得到连续状态空间平均模型。在此基础上，运用小信号分析法，可以非常方便地使用频域分析的各种工具。

当 SPWM 是线性调制时，输出脉宽与参考正弦波幅值成正比，将开关函数用 $\bar{S}$ 近似表示为：

$$\bar{S} = 1\cdot D + 0\cdot(1-D) = D = \frac{1}{2}\left(1+\frac{U_r}{U_M}\right) \tag{18}$$

其中，$D$ 为占空比；$U_M$ 为三角载波峰值；$U_r$ 为调制波幅值。

令调制度 $M=U_r/U_M$，并将式(18)代入式(17)后得到：

$$\bar{U}_i = MU_d\sin(\omega t) \tag{19}$$

将式(19)代入式(16)得到：

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{C'}\\ \dot{I}_{L'}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & \frac{1}{C'}\\ -\frac{1}{L'} & -\frac{r}{L'}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U_{C'}\\ I_{L'}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L'}\end{bmatrix}MU_d\sin(\omega t) \tag{20}$$

式(20)就是利用状态空间平均法建立的状态空间平均模型，可以推出其频域传递函数：

$$G(s) = \frac{1}{L'C's^2 + rC's + 1} \tag{21}$$

可见系统近似为一个二阶振荡环节，尤其是在空载状态下，由于等效电阻 $r$ 很小，系统近似为无阻尼振荡环节，对扰动的抑制能力很弱。

根据式(21)可得到频域下主电路的数学模型框图，如图 6 所示。

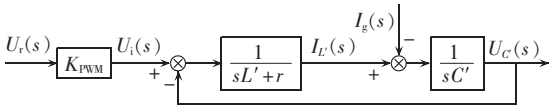


**图 6 双向 DC/AC 变换器的数学模型框图**

Fig.6 Mathematical model of bi-directional DC/AC converter

## 3 DVR 的控制策略

### 3.1 双向 DC/DC 变换器的控制策略

已有研究表明，在恒定功率负载条件下，由于恒定功率负载的负阻特性，使得控制系统存在正极点，所以开环不稳定，并且为非最小的相位系统。同时，Buck-Boost 双向变换器为二阶非线性仿射系统，即使在某一稳态点处对其进行线性化，也可能失去大信号稳定性；且参考输入或者输出功率变化的动态过程体现了非线性，不宜用线性模型表示。因此，为了保证 Buck-Boost 双向变换器在各种负载条件下，尤其是恒功率负载条件下的静态、动态特性，根据本文串级控制的思想以及稳定直流侧电压的控制目标，可以采用电感电流和电容电压状态双闭环反馈控制，控制系统框图如图 7 所示[14-16]。

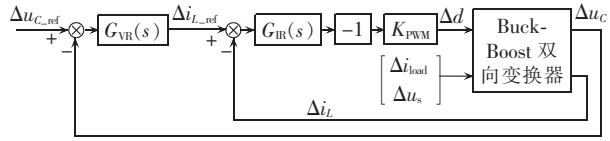


**图 7 控制系统框图**

Fig.7 Block diagram of control system

由图 4 和图 7 可建立电流的内环传递函数：

$$\Delta i_L = \frac{(sCu_{C0}+D_0 i_{L0})G_{IR}(s)K_{PWM}\Delta i_{L_ref} + sC\Delta u_s + D_0\Delta i_{load}}{(sCu_{C0}+D_0 i_{L0})G_{IR}(s)K_{PWM} + s^2LC + sr_sC + D_0^2} \tag{22}$$

其中，$D_0$ 为稳态占空比，其值在(0,1)范围内。如果不考虑控制系统的延时，电流内环则可表示成增益为 $K$ 的比例环节。而对于电容电压外环，采用恒压控制时有 $\Delta u_{C_ref}=0$，则可建立电压外环传递函数：

$$\Delta u_C = \frac{-u_{C0}\Delta i_{load} + i_{L0}\Delta u_s}{Cs + i_{load0} + K(u_{s0} - 2r_s i_{L0})G_{VR}(s)} \tag{23}$$

由式(23)可知，$\Delta u_s$ 和 $\Delta i_{load}$ 的变化将引起母线电压的波动 $\Delta u_C$。为了减少母线电压的波动，一是可以增大母线的电容，但会使得系统的体积增大，同时也会减缓系统的响应速度；二是通过加强控制器 $G_{VR}(s)$ 的作用，但是如果负荷波动较大，短时间内仍然会引起母线的电压波动。为了抑制 $\Delta u_s$ 和 $\Delta i_{load}$ 的变化对母线电压的影响，可以引入功率前馈的方法，其系统控制框图如图 8 所示。

由图 8 可建立电压外环传递函数：

$$\Delta u_C = \left[\left(KK_f\frac{u_{s0}-2r_s i_{L0}}{u_{s0}} - 1\right)\Delta i_{load} - \left(KK_f\frac{u_{s0}-2r_s i_{L0}}{u_{s0}^2}\Delta i_{load} - \frac{i_{L0}}{u_{C0}}\Delta u_s\right)\right] \Big/ \left(Cs + K\frac{u_{s0}-2r_s i_{L0}}{u_{C0}}G_{VR} + \frac{i_{load0}}{u_{C0}}\right) \tag{24}$$

结合式(12)，由式(25)可知，如果忽略电源损耗 $r_s$ 及电感，取 $K_f=1/K$ 则可完全消除 $\Delta u_s$ 和 $\Delta i_{load}$ 带来的影响，即理论上直流母线电压不再受电源电压和负荷电流的影响，暂态情况下仍然保持稳定。

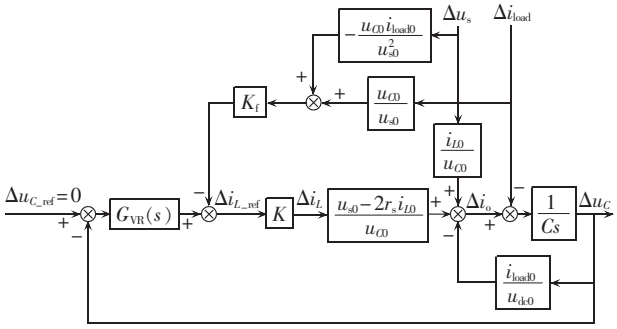


图8 带功率前馈的系统控制框图

Fig.8 Block diagram of system control with power feed-forward

### 3.2 双向DC/AC变换器的控制策略

电压相位一般通过锁相环(PLL)来监测,假定同步旋转坐标系 $d$ 轴的方向和a相电压的方向一致,根据 $abc/dq$ 坐标变换可求得负荷电压的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量:

$$\begin{cases} u_{fd}=u_f\cos\theta \\ u_{fq}=-u_f\sin\theta \end{cases} \tag{25}$$

其中,$u_f$ 为负荷额定电压的标幺值;$u_{fd}$ 和 $u_{fq}$ 分别为负荷电压 $d$ 轴和 $q$ 轴分量的标幺值。根据负荷变化和电源电压可得到负荷电压的 $d$ 轴和 $q$ 轴参考值:

$$\begin{cases} u_{fq,ref}=-P_f X_s/u_f \\ u_{fd,ref}=\sqrt{1-u_{fq,ref}^2} \end{cases} \tag{26}$$

其中,$P_f$ 为负荷额定功率的标幺值;$u_{fd,ref}$ 为负荷电压 $d$ 轴分量的参考值;$u_{fq,ref}$ 为负荷电压 $q$ 轴分量的参考值。

为了通过实现解耦控制来提高DVR的响应速度,本文采用前馈补偿的PI反馈控制法来控制此DVR,控制原理如图9所示。图中,$u_{fa}$、$u_{fb}$ 和 $u_{fc}$ 为负荷相电压;$u_{sa}$、$u_{sb}$ 和 $u_{sc}$ 为电源相电压;$i_a$、$i_b$ 和 $i_c$ 为双向DC/AC变换器交流侧的输入电流[16-19]。

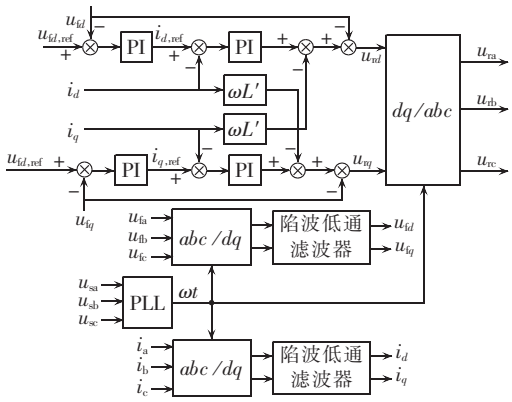


图9 双向DC/AC变换器控制框图

Fig.9 Block diagram of bi-directional DC/AC converter control

实现控制策略的关键是如何选择滤波器。为滤除经过同步旋转坐标变换后的电流和电压的负序分量,本文采用陷波低通滤波器,此种滤波器的响应速度较快。当负荷电压信号变化时,控制信号 $\Delta u_{fd}$ 和 $\Delta u_{fq}$ 分别通过比例积分(PI)环节产生电流控制信号 $i_{d,ref}$ 和 $i_{q,ref}$,采用解耦前馈控制得到电压控制量 $u_{rd}$ 和 $u_{rq}$ 后,再经过 $dq/abc$ 坐标变换成参考电压 $u_{ra}$、$u_{rb}$ 和 $u_{rc}$,最后将其输入到SPWM调制器中。

## 4 系统仿真实验

基于PSCAD/EMTDC软件平台对所设计的DVR进行了仿真分析。电源功率因数为0.99;供电频率为50 Hz;负荷的线电压额定值为0.4 kV,额定功率为15 kW;负载为三相对称电阻。超级电容器采用ESMA公司30EC402U模块,单个电容器模块电压为45 V、电容为330 F、等效串联电阻为9 mΩ、最大功率为20 kW,超级电容器组由上述4个模块串联而成。在0.2~0.3 s,a、b、c三相分别发生10%、50%的电压暂降和电压中断,仿真结果如下。

**a.** a、b、c三相同时发生10%的电压暂降。仿真波形如图10、11所示。

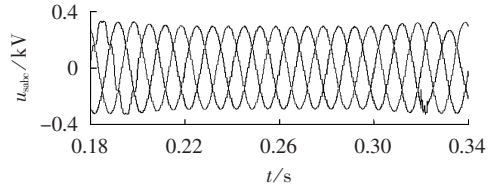


图10 发生10%电压暂降时的三相电压波形

Fig.10 Three-phase voltage waveforms during 10% voltage sag

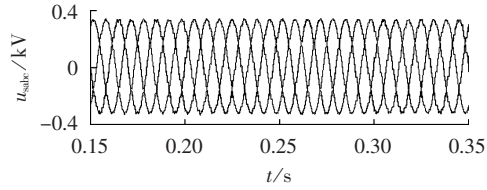


图11 补偿后的三相电压波形

Fig.11 Three-phase voltage waveforms after compensation

**b.** a、b、c三相同时发生50%的电压暂降。仿真波形如图12—15所示。

**c.** a、b、c三相同时发生电压中断。仿真波形如图16、17所示。

由图10、12、16可见,相电压瞬时值从0.33 kV $\left(\frac{0.4}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}=0.33\right)$ 分别暂降到0.297 kV、0.165 kV、

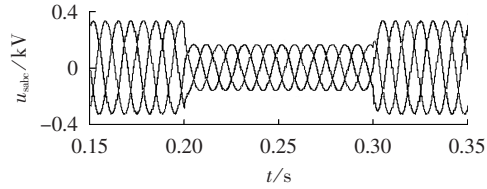


图12 发生50%电压暂降时的三相电压波形

Fig.12 Three-phase voltage waveforms during 50% voltage sag

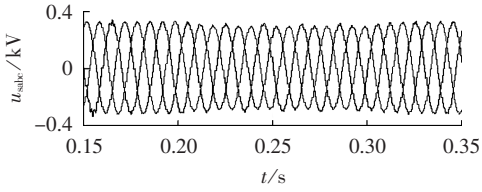


图 13 补偿后的三相电压波形

Fig.13 Three-phase voltage waveforms after compensation

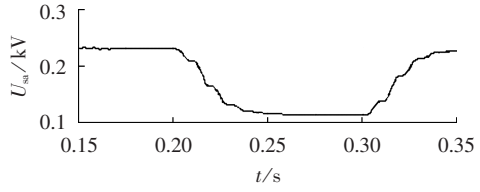


图 14 补偿前 a 相电压有效值

Fig.14 RMS value of phase-a voltage before compensation

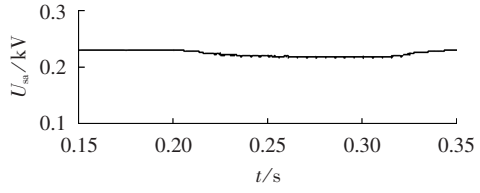


图 15 补偿后 a 相电压有效值

Fig.15 RMS value of phase-a voltage after compensation

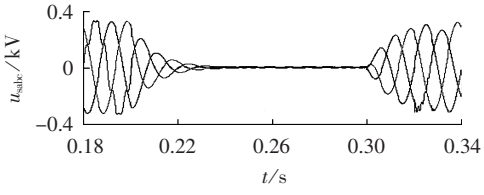


图 16 电压发生中断时的三相电压波形

Fig.16 Three-phase voltage waveforms during voltage interrupt

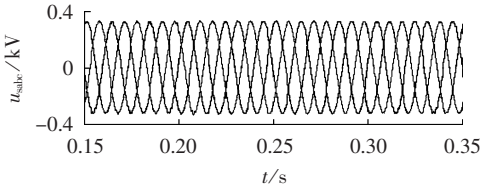


图 17 补偿后的三相电压波形

Fig.17 Three-phase voltage waveforms after compensation

0.03 kV。图 11、图 13、图 17 为连接 DVR 补偿后的电压波形,负载相电压经过约 20 ms 恢复至额定值。

## 5　结论

本文对 DVR 的补偿特性进行了分析,可以看出无储能 DVR 补偿时电压幅值和电压相位无法完全兼顾,且补偿范围有限,补偿前后对负载的冲击较大。因此,为了达到比较好的补偿效果,利用超级电容器作为直流侧的储能单元,在电源电压发生暂降时可调节负荷电压,提高负荷电压的稳定性。仿真结果表明了本文所设计的 DVR 具有良好的动态补偿性能和负载适应性,同时也验证了其拓扑结构及控制策略的正确性和有效性。

## 参考文献:

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动化设备,2003,23(12):1-4.
YANG Honggeng,XIAO Xianyong,LIU Junyong. Issues and technology assessment on power quality. part 3:voltage sags in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):1-4.

[3] 黄瀚,杨潮,韩英铎,等. 配电网动态电压调节器控制策略的研究[J]. 电网技术,2003,26(1):1-4.
HUANG Han,YANG Chao,HAN Yingduo,et al. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network[J]. Power System Technology,2003,26(1):1-4.

[4] 蒋平,赵剑锋,唐国庆. 串联型电能质量补偿器的实验研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(4):41-43.
JIANG Ping,ZHAO Jianfeng,TANG Guoqing. Test study of series power quality compensator[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(4):41-43.

[5] 张慧妍,韦统振,齐智平. 超级电容器储能装置研究[J]. 电网技术,2006,30(8):92-96.
ZHANG Huiyan,WEI Tongzhen,QI Zhiping. Study on ultracapacitor energy storage[J]. Power System Technology,2006,30(8):92-96.

[6] 鲁蓉,张建成. 超级电容器储能系统在分布式发电系统中的应用[J]. 电力科学与工程,2006(3):63-67.
LU Rong,ZHANG Jiancheng. Application of super capacitor energy storage system to distributed generation system[J]. Electric Power Science and Engineering,2006(3):63-67.

[7] 高朝晖,林辉,张晓斌. Boost 变换器带恒功率负载状态反馈精确线性化与最优跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(13):70-75.
GAO Zhaohui,LIN Hui,ZHANG Xiaobin. Exact linearization and optimal tracking control of Boost converter with constant power loads[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(13):70-75.

[8] RUFER A. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in week transportation networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(2):629-636.

[9] WU R,DEWAN S,SLEMON G. A PWM AC to DC converter with fixed switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1990,2(5):880-885.

[10] WOODLEY N H,MORGAN L,SUNDARAM A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(3):1181-1186.

[11] 张方华,朱成花,严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):46-49.
ZHANG Fanghua,ZHU Chenghua,YAN Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):46-49.

[12] CHOI S S,LI B H,VILATHGAMUWA D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(1):51-57.

[13] NAIDOO R,PILLAY P. A new method of voltage sag and swell detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(2):1056-1063.
[14] ZUBIETA L,BONERT R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000,36(1):199-205.
[15] VILATHGAMUWA M,PERERA R,CHOI S. Control of energy optimized dynamic voltage restorer[C]//Proceedings of IEEE IECON'99. San Jose,USA:[s.n.],1999:873-878.
[16] AL-HADIDI K,GOLE A M,JACOBSON D A. Minimum power operation of cascade inverter-based dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):889-898.
[17] TAKUSHI J,HIDEAKI F,HIROFUMI A. An approach to eliminating DC magnetic flux from the series transformer of a dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2008,44(3):809-816.
[18] CONRAD L E,BOLLEN M H J. Voltage sag coordination for reliable plant operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Application,1997,12(33):1459-1464.
[19] ARUN A,KEVIN C,THOMAS J,et al. Innovative system solutions for power quality enhancement[J]. ABB Review,1998(3):4-12.

**作者简介：**

易桂平(1981-),男,江西吉安人,博士研究生,主要从事电力电子技术在电力系统中的应用、微网电能质量方面的研究工作(**E-mail**:ygp326@163.com);

胡仁杰(1962-),男,江苏苏州人,教授,博士,主要从事分布式发电、电能质量管理及超级电容器储能方面的研究工作。

## Dynamic voltage restorer based on super capacitor energy storage system

YI Guiping,HU Renjie

(College of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

**Abstract**: The mathematical models of SCES(Super Capacitor Energy Storage) system are built based on the equivalent circuits and a kind of DVR(Dynamic Voltage Restorer) based on SCES is designed,which uses the super capacitor as the storage component at its DC side,applies the non-isolated Buck-Boost bi-directional DC/DC converter in its double closed-loop power feed-forward control and adopts the bi-directional voltage-source DC/AC converter in its decoupling and feed-forward compensation control. Its operating principle is established according to the characteristics of SCES,which regulates the active and reactive powers of DC/AC converter to stabilize the load voltage when the source voltage drops. The correctness and effectiveness of the designed DVR are verified by simulation and experiment.

**Key words**: dynamic voltage restorer; control; super capacitor; energy storage

(上接第20页 continued from page 20)

**作者简介：**

曾　鸣(1957-),男,山西太原人,教授,博士研究生导师,研究方向为能源经济与电力市场;

王睿淳(1969-),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,研究方向为储能资源规划与调度;

李凌云(1989-),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为智能电网与低碳电力(**E-mail**:lingyunzhuangzhi2008@126.com);

薛　松(1986-),男,山东淄博人,博士研究生,研究方向为智能配网投资与决策。

## Optimal dispatch based on fitness function for pumped-storage hydropower

ZENG Ming,WANG Ruichun,LI Lingyun,XUE Song

(Research Center of Energy and Electricity Economics,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

**Abstract**: An optimal joint dispatch model is built for the power system containing pumped-storage hydropower,wind farm and nuclear station,which takes the total operational cost as its objective. An algorithm based on fitness function is proposed to solve the model. Research shows that,the effect of load shifting by pumped-storage units is excellent,with the deduction up to 1.212% of total power system cost and 60.456% of carbon emission cost respectively;when the transmission capacity of pumped-storage units is adequate and that of wind farm is limited,the benefit of load shifting by pumped-storage unit is the best, with the lowest total power system cost and carbon emission cost.

**Key words**: pumped-storage hydropower units; hydropower wind power; optimal dispatch; fitness function; load shifting; carbon emission cost; models