

三相三线动态电压恢复器最优控制策略

周卫平¹, 师 维¹, 王智勇², 吴正国¹, 孙东亮¹

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033;
2. 浙江杭申电气集团有限公司, 浙江 杭州 311234)

摘要: 分析简化了线电压补偿型三相三线动态电压恢复器(DVR)的拓扑结构,提出了基于控制方程最优解的 DVR 最优化控制方法。基于数字锁相的方法检测得到补偿电压,分析推导了 DVR 电压控制的时域电路方程,求得了电压控制方程在最优化指标下的最优解。该方法基于 DVR 输出的线电压计算开关时间,减少了计算和转换环节,提高了直流侧电压的利用率和 DVR 的补偿能力。仿真和实验结果证明了所提控制方法的正确性和可行性。

关键词: 动态电压恢复器; 电压暂降; 最优化控制; 最优解; 电压控制; 补偿

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.016

0 引言

随着大量工业数控等敏感负载的投入使用和工业自动化程度的不断提高,电力用户对电能质量问题越来越敏感。而随着电力电子设备的广泛应用,电力系统电能质量问题却日益严重,电网电压下陷、过冲、谐波、闪变直至瞬间失电等电能质量扰动问题不可避免,其中电压暂降已经成为影响电力负荷安全运行最突出和普遍的问题。电能质量问题会缩短设备寿命甚至导致灾难性的经济损失。动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer,或称瞬态电压恢复器)被认为是目前解决电压暂降问题最经济、有效的用户电力装置^[1-16],它是通过控制电力电子逆变器产生一组幅值相位波形可控的交流电压注入电网,在源端存在电压扰动时保证敏感负载端电压的稳定。

DVR 总体上可以分为相电压补偿型 DVR 和线电压补偿型 DVR。相电压补偿型 DVR 具有控制方便、可以分相补偿、可以补偿零序电压的优点,但是存在功率器件多、体积大、造价高等缺点;线电压补偿型 DVR 则具有结构简单、功率器件少、体积相对小的优点,但是存在控制复杂、无法补偿零序电压的缺点。由于我国中压配电网普遍采用中性点不接地系统^[1],并且三相三线制供电方式在许多场合得到广泛应用,所以线电压补偿型 DVR 有广泛的应用前景。

本文对线电压补偿型三相三线 DVR 的拓扑结构进行了简化,分析得出了 DVR 电压控制的时域电

路方程,求得该电压控制方程在最优化指标下的最优解。该最优解是基于 DVR 输出的线电压来计算开关时间的,减少了线电压转换为相电压的环节,并且可以提高直流侧电压的利用率以及 DVR 的补偿能力。补偿电压的检测是基于数字锁相的方法得到的。文中对所提出的控制策略和实现方案进行了具体分析,并给出了仿真和实验结果,结果表明本文方法是可行的。

1 主电路拓扑结构与简化

三相三线制供电方式下,采用变压器注入方式的线电压补偿型 DVR 接线图如图 1 所示,其中整流模块可以采用不控整流,逆变模块采用三相逆变桥。以假想的中点 O 为电网电压参考点, $u_{a'O}$ 、 $u_{b'O}$ 、 $u_{c'O}$ 为电网侧相电压, u_{aO} 、 u_{bO} 、 u_{cO} 为负载端相电压, u_{dc} 为 DVR 直流侧电压值,假设注入变压器变比为 1:1,可以列写电路方程:

$$\begin{aligned} u_{aO} &= u_{a'O} + u_{aa'} = u_{a'O} - u_{A'O'} \\ u_{bO} &= u_{b'O} + u_{bb'} = u_{b'O} - u_{B'O'} \\ u_{cO} &= u_{c'O} + u_{cc'} = u_{c'O} - u_{C'O'} \end{aligned} \quad (1)$$

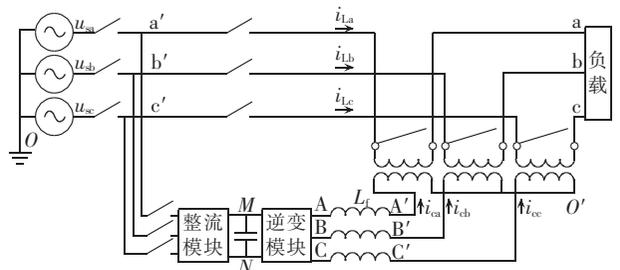


图 1 三相三线 DVR 接线图

Fig.1 Main circuit of three-phase three-wire DVR

设 DVR 的滤波电感均为 L_f ,考虑电感内阻为 r ,对 DVR 可列写电路方程:

收稿日期:2013-01-25;修回日期:2013-12-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207164)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207164)

$$\begin{aligned} u_{AO'} - u_{A'O'} &= L_f \frac{di_{ca}}{dt} + r i_{ca} \\ u_{BO'} - u_{B'O'} &= L_f \frac{di_{cb}}{dt} + r i_{cb} \\ u_{CO'} - u_{C'O'} &= L_f \frac{di_{cc}}{dt} + r i_{cc} \end{aligned} \quad (2)$$

实际上对于三相三线制系统,只需要线电压符合负载要求即可,式(2)中只有 2 个方程是独立的,即补偿电压 $u_{a'a}$ 、 $u_{b'b}$ 、 $u_{c'c}$ 也只有 2 个量是独立的,因而对 $u_{AO'}$ 、 $u_{BO'}$ 、 $u_{CO'}$ 的控制也只需要保证线电压符合负载要求即可,这样就可以选择一种令 $u_{c'c}=0$ 的控制方式,于是三相三线制供电方式下,图 1 的拓扑结构可以简化为图 2,这样减少了硬件费用,同时控制也更加明了。

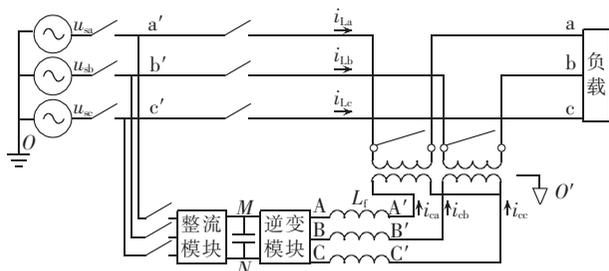


图 2 三相三线 DVR 拓扑结构简化

Fig.2 Simplified topological structure of three-phase three-wire DVR

2 补偿电压的检测

电压扰动快速测量是电压恢复的前提,有文献选用坐标变换的方法^[5],本文采取基于数字锁相的检测方法。利用三角函数正交性原理,构造基波初相检测的控制框图如图 3 所示。

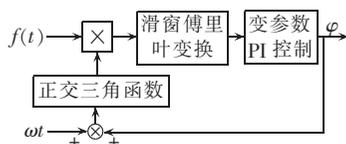


图 3 基波初相检测控制框图

Fig.3 Block diagram of fundamental initial-phase detection

其基本原理是利用计算机产生的初定频率下的旋转角度值加上输出的初始相位值的与测量信号基波正交的三角函数作为反馈,并与测量信号相乘,利用稳态时其与测量信号的基波正交的特点,把所得的乘积经过低通滤波以及 PI 控制器后输出作为跟踪的初始相位,该检测方法对信号噪声不敏感,不依赖于过零点检测,从而使该方法具有较强的鲁棒性^[17]。

在检测得到了线电压的相位信息后,负载端线电压的理想值可以写为:

$$\begin{aligned} u_{ac}^* &= 380\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi) \\ u_{bc}^* &= 380\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi - \pi/3) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, ω 为基波角频率, φ 为检测到电源端线电压 $u_{a'c'}$ 的基波初相。设 $u_{A'C'}^*$ 、 $u_{B'C'}^*$ (即 $u_{a'a}^*$ 、 $u_{b'b}^*$) 为补偿电压的指令值,则有:

$$\begin{aligned} u_{A'C'}^* &= u_{a'a}^* = u_{a'c'}^* - u_{ac}^* \\ u_{B'C'}^* &= u_{b'b}^* = u_{b'c'}^* - u_{bc}^* \end{aligned} \quad (4)$$

3 DVR 最优化控制策略

3.1 DVR 电压控制方程的建立

三相逆变桥是图 2 中 DVR 的控制核心,DVR 的控制等效为对逆变桥输出电压的控制。设图 2 中 O' 点为虚拟浮地点,且在任意时刻条件 $u_{AO'} + u_{BO'} + u_{CO'} = 0$ 均能满足,而 $u_{AO'}$ 、 $u_{BO'}$ 、 $u_{CO'}$ 的理想值 $u_{AO'}^*$ 、 $u_{BO'}^*$ 、 $u_{CO'}^*$ 为:

$$\begin{aligned} u_{AO'}^* &= u_{A'O'}^* + L_f \frac{di_{ca}}{dt} + r i_{ca} \\ u_{BO'}^* &= u_{B'O'}^* + L_f \frac{di_{cb}}{dt} + r i_{cb} \\ u_{CO'}^* &= u_{C'O'}^* + L_f \frac{di_{cc}}{dt} + r i_{cc} \end{aligned} \quad (5)$$

忽略滤波电感以及内阻上的工频压降,结合式(4)有:

$$\begin{aligned} u_{AC}^* &= u_{A'C'}^* = u_{a'a}^* = u_{a'c'}^* - u_{ac}^* \\ u_{BC}^* &= u_{B'C'}^* = u_{b'b}^* = u_{b'c'}^* - u_{bc}^* \end{aligned} \quad (6)$$

把逆变桥的上臂中与 A、B、C 相连的开关管的开关状态记为开关状态量,则当其开关状态量为 (j_a, j_b, j_c) ,其中 $j_a, j_b, j_c \in \{0, 1\}$,有:

$$\begin{aligned} u_{AO'} &= u_{dc} (2j_a - j_b - j_c) / 3 \\ u_{BO'} &= u_{dc} (-j_a + 2j_b - j_c) / 3 \\ u_{CO'} &= u_{dc} (-j_a - j_b + 2j_c) / 3 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, u_{dc} 为直流侧电压值,可见只能控制具有阶跃变化性质的电压 $u_{AO'}$ 、 $u_{BO'}$ 、 $u_{CO'}$ 在开关周期内的平均值与理想值 $u_{AO'}^*$ 、 $u_{BO'}^*$ 、 $u_{CO'}^*$ 相等。

开关状态量 (j_a, j_b, j_c) 共有 8 种开关状态,依据对应二进制数 $j_a j_b j_c$ 的数值从小到大的顺序将它们定义为 $k_0 - k_7$,每一种开关状态的控制电压向量 $\mathbf{u}(i) = [u_{AO'}(i), u_{BO'}(i), u_{CO'}(i)]^T$ 亦可由式(7)得到。在一个开关周期 T_s 内设每一种开关状态的累积导通时间分别为 $\Delta t(i)$,则可进一步得到 DVR 电压控制的时域电路方程:

$$\frac{1}{T_s} [\mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{t}] = \begin{bmatrix} u_{AO'}^* \\ u_{BO'}^* \\ u_{CO'}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{u} = [\mathbf{u}(0), \mathbf{u}(1), \dots, \mathbf{u}(6), \mathbf{u}(7)]$, $\Delta \mathbf{t} = [\Delta t(0), \Delta t(1), \dots, \Delta t(6), \Delta t(7)]^T$ 。

3.2 基于方程最优解的最优化控制

依据所建 DVR 电压控制的时域电路方程,先讨论 $u_{AO}^* > -u_{BO}^* \geq -u_{CO}^* > 0$ 时方程的求解。由于 u_{AO}^* 的绝对值最大,并且为正值,因而开关状态量将只能从 k_0 或 k_7 以及使 A 的电压正向增大的开关状态量,即 $k_4(1,0,0)$ 、 $k_5(1,0,1)$ 、 $k_6(1,1,0)$ 中选取,从而保证对 u_{AO}^* 的有效跟踪^[18]。即有:

$$\begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/3 & -2/3 & 1/3 \\ -1/3 & 1/3 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t(4) \\ \Delta t(5) \\ \Delta t(6) \end{bmatrix} = \frac{T_s}{u_{dc}} \begin{bmatrix} u_{AO}^* \\ u_{BO}^* \\ u_{CO}^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

以上方程组是奇异的,如果附加最优化指标条件 $J = \sum_{i=1}^6 \Delta t(i) = \min$, 由于 $\Delta t(4)$ 、 $\Delta t(5)$ 、 $\Delta t(6)$ 均为非负数,由式(9)可得:

$$\begin{cases} \Delta t(4) + \Delta t(5) + \Delta t(6) = T_s u_{AB}^* / u_{dc} + \Delta t(6) \geq T_s u_{AB}^* / u_{dc} \\ \Delta t(4) + \Delta t(5) + \Delta t(6) = T_s u_{AC}^* / u_{dc} + \Delta t(5) \geq T_s u_{AC}^* / u_{dc} \\ \Delta t(5) = T_s u_{CB}^* / u_{dc} + \Delta t(6) \geq T_s u_{CB}^* / u_{dc} \end{cases} \quad (10)$$

而式(10)的第 1 个和第 2 个方程取得“=”的条件分别为“ $\Delta t(6)=0$ ”和“ $\Delta t(5)=0$ ”,从式(10)第 3 个方程可以知道: $\Delta t(5) \geq \Delta t(6)$, 因而在 $\sum [\Delta t(4) + \Delta t(5) + \Delta t(6)] = \min$ 成立的情况下,有“ $\Delta t(5) \geq 0$, $\Delta t(6)=0$ ”,此时式(10)的第 1 个方程可取得“=”,且 $\min \sum [\Delta t(4) + \Delta t(5) + \Delta t(6)] = T_s u_{AB}^* / u_{dc}$ 。于是由“ $\Delta t(6)=0$ ”可以得到方程式(8)在满足 $\sum_{i=1}^6 \Delta t(i) = \min$ 时的最优解为:

$$\begin{aligned} \Delta t(4) &= \frac{T_s}{u_{dc}} (u_{AO}^* - u_{CO}^*) = \frac{T_s}{u_{dc}} u_{AC}^* \\ \Delta t(5) &= \frac{T_s}{u_{dc}} (u_{CO}^* - u_{BO}^*) = \frac{T_s}{u_{dc}} u_{CB}^* \\ \Delta t(6) &= T_s - \Delta t(4) - \Delta t(5) \end{aligned} \quad (11)$$

依该方法求得在满足 $J = \sum_{i=1}^6 \Delta t(i) = \min$ 时方程式(8)的最优解有表 1 中的 6 种情形。其中,+、- 分别表示对应项为非负数、负数; $k_i \times t(m,n)$ 表示第 i 种开关模式的导通时间为 $t(m,n)$, $t(m,n) = \frac{T_s}{u_{dc}} (u_{mO}^* - u_{nO}^*)$, 并且 $m, n \in \{A, B, C\}$; 在 T_s 内剩余的时间由 k_0 来补充。在得到补偿电压的指令值之后,最优化控制就可以按照以上求得的最优解来进行。

表 1 控制方程的最优解

Tab.1 Optimal solution of control equation

情形	u_{AB}^*	u_{BC}^*	u_{CA}^*	方程的最优解
I	+	+	-	$k_4 \times t(A, B) + k_6 \times t(B, C)$
II	-	+	-	$k_2 \times t(B, A) + k_6 \times t(A, C)$
III	-	+	+	$k_2 \times t(B, C) + k_3 \times t(C, A)$
IV	-	-	+	$k_1 \times t(C, B) + k_3 \times t(B, A)$
V	+	-	+	$k_1 \times t(C, A) + k_5 \times t(A, B)$
VI	+	-	-	$k_4 \times t(A, C) + k_5 \times t(C, B)$

3.3 提高线电压补偿能力的分析

如图 2 所示,三相三线 DVR 可以通过补偿 2 个相电压 $u_{a'a}$ 、 $u_{b'b}$ 来达到补偿负载端线电压的目的,而 $u_{a'a}$ 、 $u_{b'b}$ 在变压器原边又转化为 A'、B'、C' 的线电压 $u_{A'C'}$ 、 $u_{B'C'}$ 来进行补偿,进一步转化为 A、B、C 电压的调制计算,这为三相三线 DVR 改进调制算法以提高补偿能力提供了条件。

一般电压源型 PWM 逆变器的开关控制策略是基于相电压来进行调制的,如采用三角载波线性调制,但采用相电压三角载波调制,DVR 三相逆变器的最大输出能力是使输出线电压的峰值等于 $u_{dc}/2$, 直流电压的利用率十分低^[1],导致 DVR 补偿能力较差。这主要是因为三角载波调制是以直流侧中点为参考,其结果是使得输出电压中点电位等于直流侧中点电位,而对于三相三线 DVR 可以利用中点电压的浮动来提高补偿能力。但是在线电压转化为相电压来进行调制时,如果选择不合理,将使得 DVR 逆变输出电压包含较大的共模电压,也影响 DVR 补偿能力。

本文提出的方法是基于 DVR 输出的线电压指令来计算开关时间的,减少了线电压转换为相电压的一个环节;本文采用优化指标 $J = \sum_{i=1}^6 \Delta t(i) = \min$ 就是基于对于有效矢量 k_1-k_6 的“最小限度”的占用,来达到输出要求电压的目的,从而使得有效矢量能够有能力输出更大的补偿电压,其本质是通过中点电压浮动来提高输出线电压,达到和 SVPWM 类似的效果。而本文方法比普通 SVPWM 的算法要简单得多。本文方法是基于 $\sum_{i=1}^6 \Delta t(i) = \min$ 求得控制方程的最优解,在 T_s 内剩余的时间由 k_0 补充的情况下,保证了在直流侧电压一定时提高直流侧电压的利用率,从而提高了 DVR 的补偿能力^[15]。

4 仿真和实验验证

为了验证本文所提的方法,进行了仿真和实验验证。图 4 和图 5 是三相三线 DVR 的仿真结果。其中,图 4 是线电压较缓慢跌落时补偿的结果(只显示了线电压 u_{ac}),电压降低得到了较好的补偿;图 5 是三相 DVR 补偿三相电压同时瞬间跌落并且电压有谐波的补偿效果,线电压跌落超过 40%,经 DVR 补偿后的负载端电压正常并且消除了电压谐波。

实验平台的可控功率管为 SKM75GB128D 的 IGBT 管,最大开关频率为 10 kHz;检测和控制单元核心是 TMS320F28335 的 DSP。图 6 是三相电压缓慢跌落时补偿的实验结果;图 7 是三相电压跌落同时严重畸变的实验结果,电压的幅值短时下降幅度

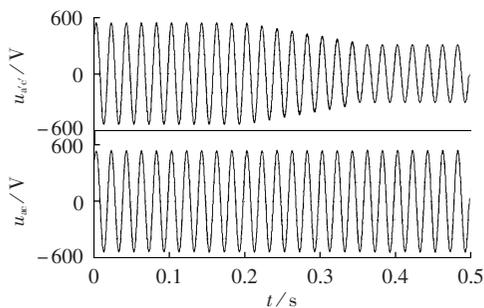


图4 三相电压缓变的DVR仿真结果

Fig.4 Simulative waveforms of DVR for slow variation of three-phase voltage

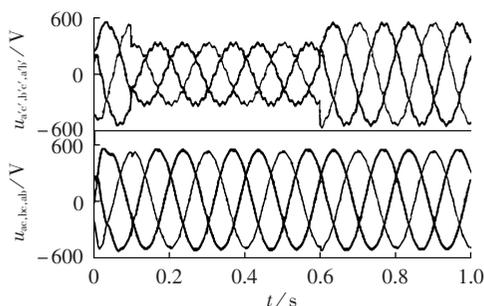


图5 三相含谐波电压瞬时跌落的DVR仿真效果

Fig.5 Simulative waveforms of DVR for sudden sag of three-phase voltage with harmonics

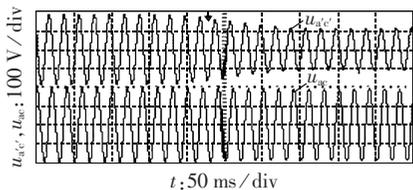


图6 三相电压缓变的DVR实验结果

Fig.6 Experimental waveforms of DVR for slow variation of three-phase voltage

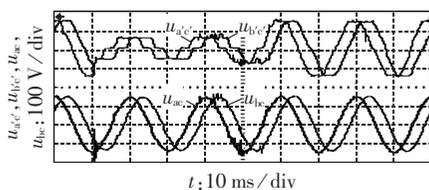


图7 三相电压跌落同时严重畸变的实验结果

Fig.7 Experimental waveforms of DVR for three-phase voltage sag with serious distortion

接近50%，并且严重畸变，THD值达到30%，经过DVR补偿后，负荷侧电压维持在给定值，THD值也下降到近3%，可以发现实验结果和仿真结果一致，DVR达到了同时治理电压谐波畸变和电压暂降的目的。

5 结论

本文对线电压补偿型三相三线DVR的拓扑结构进行了分析简化，分析得出了DVR电压控制的时域电路方程，并且求得了该电压控制方程在最优化

指标下的最优解。该最优解是基于DVR输出的线电压来计算开关时间的，减少了线电压转换为相电压的环节，并且提高了直流侧电压的利用率和DVR的补偿能力。补偿电压的检测是基于数字锁相的方法得到的，对于提出的控制策略和实现方案进行了分析，给出了仿真和实验结果，结果表明本文方法是可行的。

参考文献:

- [1] 刘昊,韩民晓,尤勇,等. 线电压补偿型DVR的补偿能力分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):54-57.
LIU Hao,HAN Minxiao,YOU Yong,et al. Analysis of compensation capability of line voltage compensation based Dynamic Voltage Recovery(DVR)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(21):54-57.
- [2] 黄本润,夏立,吴正国,等. 线电压补偿型动态电压恢复器的双前馈加反馈控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):61-64.
HUANG Benrun,XIA Li,WU Zhengguo,et al. Double feedforward plus feedback control strategy based on line voltage compensation for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(10):61-64.
- [3] 王智勇,吴正国,周卫平. 基于无差拍控制的线电压检测动态电压恢复器[J]. 电网技术,2009,33(19):106-112.
WANG Zhiyong,WU Zhengguo,ZHOU Weiping. A deadbeat control based dynamic voltage restorer with line voltage detection[J]. Power System Technology,2009,33(19):106-112.
- [4] 郭文勇,肖立业,郭金东,等. 动态电压恢复器的最优控制和最优滤波[J]. 中国电机工程学报,2009,29(6):48-54.
GUO Wenyong,XIAO Liye,GUO Jindong,et al. An optimal control strategy for dynamic voltage restorer with an optimal filter[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(6):48-54.
- [5] 周雪松,何杰,马幼捷,等. 动态电压恢复器主电路拓扑和控制算法的研究[J]. 高电压技术,2008,34(4):753-758.
ZHOU Xuesong,HE Jie,MA Youjie,et al. Main circuit topology and control algorithm of dynamic voltage restorer[J]. High Voltage Engineering,2008,34(4):753-758.
- [6] 王智勇,吴正国,周卫平,等. 基于基波特征向量提取的DVR参考电压波形生成算法[J]. 电工技术学报,2009,24(4):168-174.
WANG Zhiyong,WU Zhengguo,ZHOU Weiping,et al. A novel reference wave generating algorithm based on characteristic vector extracted for DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(4):168-174.
- [7] 王智勇,吴正国,周卫平. 直接电容接入动态电压恢复器研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):82-87.
WANG Zhiyong,WU Zhengguo,ZHOU Weiping. Study on the dynamic voltage restorers with capacitor direct-coupled[J]. Power System Protection and Control,2009,37(17):82-87.
- [8] AWAD H,BLAABJERG F. Transient performance improvement of static series compensator by double vector control[C]//Proceedings of 19th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway,NJ,USA:IEEE,2004:607-613.
- [9] 李泰,王奔,郭春平,等. 三相四桥臂动态电压恢复器滑模变结构控制仿真研究[J]. 电力科学与工程,2008,24(4):5-8.
LI Tai,WANG Ben,GUO Chunping,et al. Simulation research on three-phase four-leg DVR based on sliding mode variable

- structure control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008,24(4):5-8.
- [10] 刘牛,周荔丹,姚钢,等. 基于鲁棒 H_∞ 控制的动态电压恢复器[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):98-102.
LIU Niu,ZHOU Lidan,YAO Gang,et al. Dynamic voltage restorer based on robust H_∞ controller[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):98-102.
- [11] 陈国栋,张亮,蔡旭. 基于基波与谐波正负序提取方法的动态电压恢复器补偿策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):87-91.
CHEN Guodong,ZHANG Liang,CAI Xu. Compensation strategy based on positive and negative sequence extraction for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):87-91.
- [12] 肖昶,唐治德,金幸. 改进的动态电压恢复器[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2010,28(6):891-893.
XIAO Chang,TANG Zhide,JIN Xing. A novel dynamic voltage restorer and simulation[J]. Journal of Jiamusi University:Natural Science Edition,2010,28(6):891-893.
- [13] 朱俊星,王同勋. 一种基于飞轮储能系统的新型动态电压恢复器[J]. 机电工程,2010,27(2):93-96.
ZHU Junxing,WANG Tongxun. A novel dynamic voltage restorer with flywheel energy storage system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2010,27(2):93-96.
- [14] 葛长宏,程浩忠,王霄桦,等. 基于最小能量法的 DVR 控制算法[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):70-74.
GE Changhong,CHENG Haozhong,WANG Xiaohua,et al. DVR control algorithm based on minimal energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):70-74.
- [15] 王松岑,于坤山,汤广福. 动态电压恢复器数字矢量控制方法的性能分析及改进[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):64-71.
WANG Songcen,YU Kunshan,TANG Guangfu. Performance analysis and improvement of digital vector control algorithm for dynamic voltage restorer[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(7):64-71.
- [16] 侯世英,刘早晨,嵇丽明,等. 基于最小有功注入策略的级联逆变器动态电压恢复器[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):33-36.
HOU Shiyong,LIU Zhaochen,JI Liming,et al. Cascaded inverter dynamic voltage restorer based on minimum active power injection strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):33-36.
- [17] 周卫平,吴正国,夏立. 基波相位和频率的高精度检测及在有源电力滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):91-96.
ZHOU Weiping,WU Zhengguo,XIA Li. Harmonic and reactive current detection in APF based on high-accuracy phase and frequency detection[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):91-96.
- [18] 周卫平,吴正国,唐劲松,等. SVPWM 的等效算法及 SVPWM 与 SPWM 的本质联系[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.
ZHOU Weiping,WU Zhengguo,TANG Jinsong,et al. Novel algorithm of SVPWM and the study on the essential relationship between SVPWM and SPWM[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2):133-137.

作者简介:



周卫平(1969-),男,湖北武穴人,副教授,博士,研究方向为电力电子技术、电能质量控制技术(E-mail:cnwhwp@126.com)。

Optimal control of three-phase three-wire dynamic voltage restorer

ZHOU Weiping¹,SHI Wei¹,WANG Zhiyong²,WU Zhengguo¹,SUN Dongliang¹

(1. Naval University of Engineering,Wuhan 430033,China;

2. Zhejiang Hangshen Electrical Group Ltd.,Hangzhou 311234,China)

Abstract: The topological structure of three-phase three-wire DVR(Dynamic Voltage Restorer) is simplified and analyzed,and its optimal control based on the optimal solution of control equation is proposed. The compensation voltage is detected by the digital phase lock,the time-domain voltage control equation of DVR is deduced by analysis and its optimal solution under the optimization index is calculated. The switching time is calculated by the output line voltages of DVR to simplify the calculation and conversion for improving the utilization rate of DC side voltage and the compensation capability of DVR. Simulative and experimental results verify the validity and feasibility of the proposed control algorithm.

Key words: dynamic voltage restorer; voltage sag; optimal control; optimal solution; voltage control; compensation