

动态电压恢复器控制策略研究

蔡林海¹, 荆 平¹, 武守远¹, 李惠勋²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100085; 2. 山西晋中供电分公司, 山西 晋中 030600)

摘要: 电压补偿策略是关系动态电压恢复器(DVR)有效工作的最重要策略。首先, 简述了跌落前电压补偿法、同相电压补偿法、最小能量补偿法等几种补偿方法, 然后用相量图的形式详细地分析了上述几种补偿方法的原理。分析表明跌落前电压补偿法能保证跌落前后负载电压的连续性, 但输出电压的幅值和功率不受控制; 同相电压补偿法输出电压幅值最小、计算简单, 但输出电压相角有偏移、功率不受控制; 最小能量补偿法能优化输出的功率, 但输出电压幅值比较大、相角有偏移。在此基础上提出了一种确定 DVR 最佳补偿点的方法, 结合上述 3 种方法的优点, 在电压跌落的不同的具体情况下寻找最佳补偿点。采用该控制方法的 DVR 节约了 DVR 直流侧存储的能量, 延长了电压补偿的时间, 同时避免了系统侧电压上升时引起能量倒灌导致直流侧过电压的威胁。仿真试验验证了该方法的有效性。

关键词: 动态电压恢复器; 控制策略; 电压跌落; 补偿算法

中图分类号: TM 714.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0022-04

0 引言

近年来, 电力系统中投入了大量电力电子设备, 其非线性特性给电网造成了很大的污染^[1]。在各种电能质量问题中, 电压跌落是发生概率最高的质量问题^[2-4]。常用的减少电压跌落的解决方案有变压器分接头调节器、静止开关切换(STS)、不间断电源(UPS)、和动态电压恢复器(DVR)^[5-6], 其中效果最好的是 DVR。DVR 工作原理是: 当供电侧电压发生电压跌落后, DVR 以跌落前的用户侧电压作为参考电压, 输出一个补偿电压, 使得用户侧的电压和跌落前的电压保持一致。

DVR 系统由储能单元、逆变器和滤波电路构成。DVR 通过检测电源电压生成指令信号, 对逆变器进行控制, 叠加到负载电路中, 从而保持敏感负载电压的稳定。DVR 输出的电压受电压跌落的深度、持续的时间、负载的性质、功率因数以及 DVR 本身容量的影响。输出电压的最大值和储能单元的容量是决定 DVR 装置成本的 2 个主要指标^[7]。在文献[5-15]中分析了 DVR 电压的几种补偿方法: 跌落前电压补偿法、同相电压补偿法、最小能量补偿法等。文献[10]以提高补偿极限和注入能量优化为目标, 提出了旋转参考电压的控制策略和相应的算法。该方法在对三相电压同时进行补偿时, 具有较好的补偿效果; 但对于分相单独补偿时效果不佳。文献[15]在常用的开环控制的基础上提出了一种闭环控制策略。该方法在系统稳定的情况下可以达到比较理想的补偿效果; 但该方法却增加了控制系统的复杂性。

在常用的几种补偿方法的基础上, 用相量图的形式详细地分析了各自的特点, 并且在综合各自优点的情况下提出了一种确定最佳补偿点的控制方法。

1 3 种电压补偿方法的特点及使用范围

1.1 跌落前电压补偿法

跌落前电压补偿法要求补偿后的电压完全恢复到跌落前的负载电压。该补偿法的优点是能保证跌落前后负载电压的连续性, 对于那些对电压幅值和波形连续性要求很高的负荷, 是最佳的补偿策略。该方法的缺点是 DVR 输出的电压相量和功率不受控制。

1.2 同相电压补偿法

同相电压补偿法要求将系统跌落电压的幅值补偿到额定电压, 相位与跌落电压一致。该方法的优点是补偿电压幅值最小、计算简单。缺点是输出功率不受控制, 而且负载电压有相角偏移。

1.3 最小能量补偿法

最小能量补偿法要求补偿后的输出功率最小、电压幅值达到额定电压幅值。该方法的优点是输出的能量最小。缺点是输出电压比较大, 而且负载电压也有相角偏移。最小能量法通过减少 DVR 的有功输出, 从而在一定的储能容量下, 可以获得更长的补偿时间。在补偿电压凸起时, 最小能量法也可以减少 DVR 从系统吸收的有功, 抑制或减少能量的倒灌, 防止直流母线电压的泵升。

对于那些对电压幅值和波形连续性要求很高的负荷, 最佳的补偿策略是跌落前电压补偿法; 对于那些能容许电压幅值和相角都有一定偏移的负荷, 可以采用同相电压补偿法或最小能量补偿法。

2 3 种电压补偿方法的相量图分析

假设 DVR 具有分相补偿的能力, 并且负载不是类似发电机的非常对称的负荷, 如纯电阻负载, 于是可以分析其中的一相来说明如何实现 3 种补偿方法。

图 1~6 中, U_s 为跌落后的系统侧电压; U_L 为跌落前负荷侧电压; U_{DVR} 为 DVR 输出的补偿电压; U_{MAX}

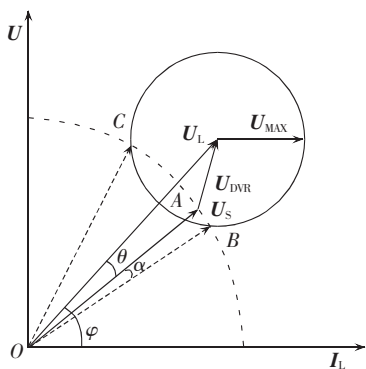


图 1 跌落前电压补偿法 (对称性负载)

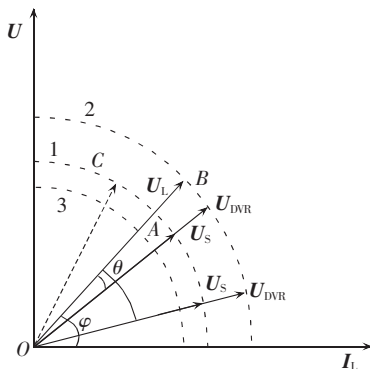
Fig.1 Pre-sag compensation
(symmetrical load)

图 2 同相电压补偿法 (对称性负载)

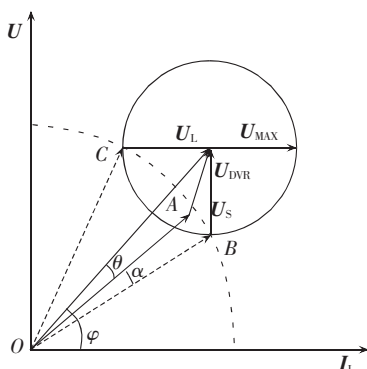
Fig.2 In-phase compensation
(symmetrical load)

图 3 最小能量补偿法 (对称性负载)

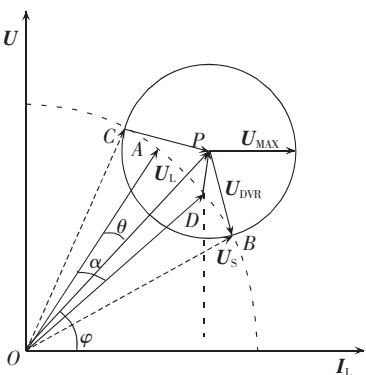
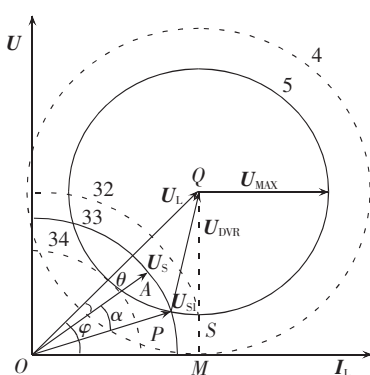
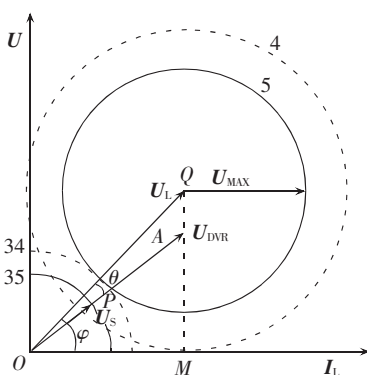
Fig.3 Minimum-energy compensation
(symmetrical load)

图 4 防止能量倒灌

Fig.4 Preventing energy feedback to DVR

图 5 $|U_L| - |U_{MAX}| \leq |U_S|$ Fig.5 $|U_L| - |U_{MAX}| \leq |U_S|$ 图 6 $|U_S| < |U_L| - |U_{MAX}|$ Fig.6 $|U_S| < |U_L| - |U_{MAX}|$

为 DVR 所能够输出的最大电压; I_L 为负荷侧电流; φ 为负载的功率因数角; θ 为跌落电压的移相角(U_S 落后 U_L 的角度)。以 U_L 顶点为圆心,以 U_{MAX} 的幅值为半径所画的圆称为补偿极限圆。

2.1 跌落前电压补偿法

如图 1 所示,如果电压跌落发生过深或者浪涌过大,引起 U_S 过小或者过大,则圆弧与补偿极限圆没有交点,此方法不能补偿跌落电压。如果圆弧与补偿极限圆有 1 个或 2 个交点,则可以补偿。跌落后的系统侧电压 U_S ,经过补偿电压 U_{DVR} 后,幅值和相位都调整到与跌落前相同。本方法要求跌落后的系统侧电压 U_S 在补偿极限圆内,否则不可补。

该方法能保证电压跌落前后用户电压完全一致。对用户而言,不会受到任何影响,幅值和相位都没有变化。缺点是补偿的电压和输出的有功功率都不能控制。如果电压跌落的深度较大,超出了 DVR 的补偿极限,本方法则无效。如果电压跌落的时间较长,对于装置一定的储能容量,则达不到补偿的要求,在跌落后期电压将补不上去。

2.2 同相电压补偿法

如图 2 所示,圆弧 3 半径为 $|U_L| - |U_{MAX}|$ 。补偿时,沿着 U_S 方向延长 U_S 与圆弧 2 有一个交点 B,向量 AB 即是需要的补偿电压 U_{DVR} 。跌落后的系统侧电压 U_S ,经过补偿电压 U_{DVR} 后,幅值调整到与跌落前相同 $|U_L|$,相位有一定的偏移,偏移的相角为 θ 。本方法要求跌落后的系统侧电压 U_S 满足 $|U_S| > |U_L| - |U_{MAX}|$,否则不可补。

该方法的优点是电压跌落深度较大时,照样能补

偿。能补偿的最大深度是 $|U_L| - |U_{MAX}|$, U_S 只要落在圆弧 2、3 之间都可以得到很好的补偿。缺点是负载端电压有相角偏移,本方法只适用于对相角偏移不敏感的负荷;并且输出端有功功率也不受控制,在电压跌落时间较长时,与跌落前电压补偿法一样,也得不到很好的补偿。

2.3 最小能量补偿法

如图 3 所示,由于 DVR 的输出功率与 U_{DVR} 和 I_L 的夹角有关,当夹角越接近 90° 时,DVR 输出的有功越小。因此可以通过改变 U_{DVR} 和 I_L 之间的夹角,使 DVR 输出的有功最小。

DVR 输出的有功应满足 $P_{DVR} = P_L - P_S$,其中, P_L 为负荷有功, P_S 为系统侧有功。

从上式可以看出,要减少 DVR 的有功输出,在负荷有功 P_L 一定的前提下,增加 P_S 就可达到。在图 3 中, U_S 的初始运行点在 A 点,如果逆时针向 C 点旋转 U_S , U_S 与 I_L 的夹角增大,系统输出的有功减少, U_{DVR} 与 I_L 的夹角减小,DVR 输出的有功增加。 U_S 旋转到 C 点,系统输出的有功最小,DVR 输出的有功最大。如果顺时针向 B 点旋转 U_S ,情况则相反,DVR 输出的有功减小。 U_S 旋转到 B 点时,系统输出的有功最大,DVR 输出的有功最小。

因此,要想满足最小能量法的要求,就应该顺时针向 B 点旋转 U_S 。但是,在旋转时要防止有功向 DVR 倒灌。

如图 4 所示防止能量倒灌:顺时针向 B 点旋转 U_S 时, U_{DVR} 与 I_L 的夹角增加,DVR 输出的有功减小。当 U_{DVR} 与 I_L 的夹角为 90° 时 (即 $\overline{DP} \perp I_L$),DVR 输

出的有功最小,等于零。再继续顺时针向 B 点旋转 U_s 时, U_{DVR} 与 I_L 的夹角大于 90° , 有功向 DVR 倒灌。因此,在这种情况下, DVR 的最佳运行点是 D 点。此时负载的全部有功都由系统侧提供, DVR 只提供无功。若初始运行点在圆弧 $\widehat{BD}$ 段, 如果用跌落前电压补偿法和同相电压补偿法来补偿, 则 DVR 输出功率为负, 即发生能量倒灌; 如果用最小能量法, 使运行点处于 D 点, 则 DVR 输出功率为零, 避免了能量倒灌。

总之, 在满足 DVR 输出有功最小和避免出现有功向 DVR 倒灌的前提下, 在圆弧 $\widehat{AB}$ 上可以找到 U_s 的最佳运行点。求出相应的 U_{DVR} , 该电压就是使 DVR 输出能量最小的补偿电压。在上述讨论中, 假定旋转了系统侧电压 U_s , 但实际上 U_s 不能旋转, 因此所带来的就是负载侧电压 U_L 相角有一定的偏移。

3 确定最佳补偿点

由上面的讨论可知, 对于那些对电压幅值和相角偏移的要求都非常高的负荷, 只能用跌落前电压补偿法进行补偿。此时的补偿能力完全依赖于 DVR 的最大电压注入能力和存储器的容量以及电压跌落的深度和时间。如果负荷只对电压幅值敏感、可以允许相角有一定的偏移, 则可以将同相电压补偿法和最小能量补偿法结合起来将补偿进行优化, 来减少能量存储器的容量或增加补偿时间。由于补偿的能力受 DVR 的最大注入电压 U_{MAX} 和跌落后系统侧电压 U_s 的影响, 因此, 可以分别讨论 U_{MAX} 和 U_s 的范围来确定 DVR 的最佳补偿点^[8]。

3.1 $|U_L| - |U_{MAX}| \leq |U_s|$ 时

DVR 的最大注入电压 U_{MAX} 和 U_s 幅值满足 $|U_L| - |U_{MAX}| \leq |U_s|$ 时, 即图 5 中所示的情况。DVR 可以在系统短路瞬间将电压补偿至原来电压大小, 并利用最小能量法使能量消耗为零或最小。 U_s 运行于 A 点, 可以使用跌落前电压补偿法, 使 U_s 补偿至 Q 点 (即 U_L 位置)。也可以使用最小能量补偿法, 将 U_s 旋转至 U_{S1} 位置, 然后补偿至 Q 点。后者可使 DVR 输出能量最小。因此, 此时的最佳补偿点是 P 点。

3.2 $|U_s| < |U_L| - |U_{MAX}|$ 时

DVR 的最大注入电压 U_{MAX} 和 U_s 幅值满足 $|U_s| < |U_L| - |U_{MAX}|$ 时, 即图 6 中所示的情况。DVR 无法将电压补偿至原来电压大小, 但是可以用同相电压补偿法, 使负载电压幅值最接近原来电压大小。此时的最佳补偿点是图中的 P 点。但是, 补偿后负载电压有一定的相移, 并且幅值也不一定满足负载要求。

总之, 当 $|U_L| - |U_{MAX}| \leq |U_s|$ 时, 总可以旋转 U_s 使补偿电压 U_{DVR} 与 I_L 的夹角接近 90° , 就可以使 DVR 输出能量最少。当 U_{DVR} 与 I_L 的夹角等于 90° 时, DVR 输出能量为 0。当 $|U_s| < |U_L| - |U_{MAX}|$ 时, 也可以用同相电压补偿法, 使负载电压幅值最接近原来电压大小。因此, 用此种方法在 DVR 存储器容量一定的时候, 总可以找到一个最佳补偿点, 来延长补偿时间, 最大能力地补偿跌落电压。

4 仿真结果

采用电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 对图 1

所示的系统进行仿真。仿真模型参数选取如下: 系统电压为 110 kV; 变压器容量为 100 MV·A, 额定电压为 110 kV/10 kV, 漏抗为 0.15 p.u.; 直流储能侧电容器为 25 000.0 μ F; 滤波电感为 0.007 7H; 滤波电容为 11.0 μ F; 载波频率为 1 650 Hz。 U_i 、 U_{di} ($i = a, b, c$) 分别为补偿前和补偿后电压。

A 点短路接地故障开始于 0.04 s, 持续 0.1 s, 电压跌落深度为 37%。故障期间采用跌落前电压补偿法进行补偿。仿真结果如图 7 所示, 负载电压得到了比较好的补偿效果。当持续时间为 0.4 s 时, 仿真结果如图 8 所示, 在电压跌落的前 0.2 s 内, 补偿效果较好, 后 0.2 s 内电压得不到很好的补偿。若此时采用最佳补偿点法进行补偿, 仿真结果如图 9 所示, 补偿后的电压在跌落的初期效果非常好, 能将电压幅值补偿到跌落前的值。但在后期, 由于 DVR 储存的能量不够, 补偿的效果要差一些。但与前面的补偿效果相比已经是非常好了。

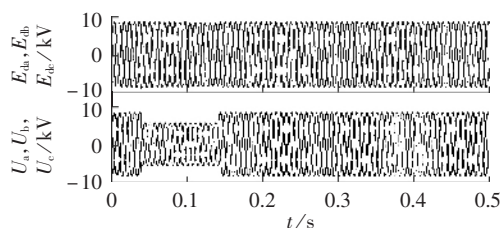


图 7 正常补偿仿真结果图

Fig.7 Simulation of normal compensation

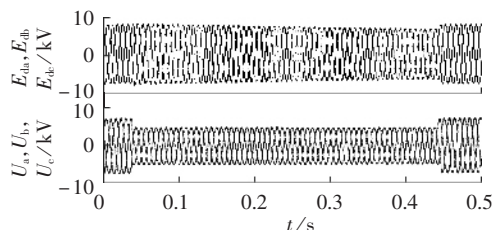


图 8 电压跌落时间较长时的补偿图

Fig.8 Simulation of voltage compensation of which the duration is long

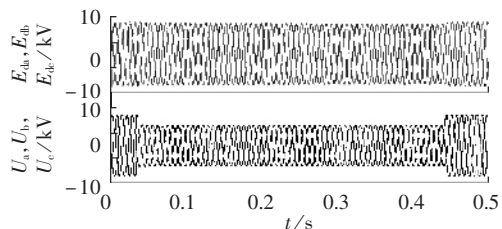


图 9 选取最佳补偿点时的图

Fig.9 Simulation voltage compensation choosing the optimal position

5 结语

最常用的 DVR 的补偿控制方法有 3 种: 跌落前电压补偿法、同相电压补偿法和最小能量补偿法, 但都存在一定的缺点。在综合这几种控制方法的基础上, 结合各自优点, 提出了确定 DVR 最佳补偿点的方法。确定 DVR 最佳补偿点的方法可以节约能量、延长补偿时间、防止能量倒灌引起的直流侧系统过电压; 并且当补偿的条件不满足时, 可以使用本方

法使负载侧电压幅值最接近跌落前电压。

仿真结果表明:在电压跌落时间较短、深度较浅时,可以使用跌落前电压补偿法将电压很好地补偿到跌落前的状态;当电压跌落时间较长,则只有使用最优能量法找到最佳补偿点来进行补偿,从而节约能量、延长补偿时间,但是补偿后的电压有一定的相移;如果电压跌落太深,对于电压等级一定的 DVR 而言,是无法使负载侧电压补偿到跌落前状态的,但也可以使用同相电压补偿法使补偿后的电压更接近所要求的幅值大小。

参考文献:

- [1] 陈志业,尹华丽,李鹏,等. 电能质量及其治理新技术[J]. 电网技术,2002,26(7):67-70.
CHEN Zhi-ye, YIN Hua-li, LI Peng, et al. Power quality problem and new technology for its improvement[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 67-70.
- [2] WANG J, CHEN S, LIE T T. Estimating economic impact of voltage sags[C]//Power System Technology—POWERCON 2004. Singapore: [s.n.], 2004: 21-24.
- [3] 冯小明,杨仁刚. 动态电压恢复器的形态学—— dq 变换综合检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 193-198.
FENG Xiao-ming, YANG Ren-gang. A novel integrated morphology— dq transformation detection algorithm for dynamic voltage restorer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 193-198.
- [4] The Working Group on Monitoring Electric Power Quality. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S]. Tampa, USA: IEEE, 1995.
- [5] DEGENEFF R C, BARSS R, RAEDY S. Reducing the effect of sags and monetary interruptions: a total owning cost prospective [C]//IEEE ICHQP IX. Orlando, USA: IEEE, 2000: 397-403.
- [6] 蒋平,赵剑锋,唐国庆,等. 串联型电能质量补偿器的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 54-57.
JIANG Ping, ZHAO Jian-feng, TANG Guo-qing, et al. Study on series power quality compensator[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 54-57.
- [7] VILATHGAMUWA D M, PERERA A A D R, CHOI S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 928-936.
- [8] 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.
- [9] NIELSEN J G, BLAAJERG F, MOHAN D N. Control strategies

- for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump[C]//IEEE Applied Power Electronic Conference and Exposition. Anaheim, USA: IEEE, 2001: 1267-1273.
- [10] 张秀娟,杨潮,唐志,等. 串联型电能质量控制器注入电压的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 15-20.
ZHANG Xiu-juan, YANG Chao, TANG Zhi, et al. The voltage injection analysis in series power quality controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 15-20.
 - [11] 冯小明,杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 68-72.
FENG Xiao-ming, YANG Ren-gang. The research of the dynamic voltage restorer compensation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 68-72.
 - [12] 袁川,杨洪耕. 动态电压恢复器的改进最小能量控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 49-53.
YUAN Chuan, YANG Hong-geng. Advanced minimum-energy control of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 49-53.
 - [13] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Lian-guang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase-angle jump[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 64-69.
 - [14] 尹忠东,李奇睿,韩民晓. 考虑阻尼电阻影响的动态电压调节器线路侧滤波器设计[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 64-67.
YIN Zhong-dong, LI Qi-rui, HAN Min-xiao. Line side filter design for dynamic voltage restorer considering effect of damp resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 64-67.
 - [15] 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, 2002, 26(1): 1-4.
HUANG Han, YANG Chao, HAN Ying-duo, et al. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 1-4.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

蔡林海(1980-),男,湖北英山人,硕士研究生,主要从事电力电子在电力系统中的应用及电能质量方面的研究工作(E-mail:linhai@epri.ac.cn);

荆平(1965-),男,山西晋中人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统控制与保护技术以及电力电子装置的研发和应用;

武守远(1964-),男,山东济南人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、FACTS 技术及电力电子装置的应用;

李惠勋(1965-),男,山西晋中人,高级工程师,主要研究方向为电力系统控制。

Control strategies of dynamic voltage restorer

CAI Lin-hai¹, JING Ping¹, WU Shou-yuan¹, LI Hui-xun²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

2. Jinzhong Power Supply Company, Jinzhong 030600, China)

Abstract: As voltage compensation strategy is the main part of DVR(Dynamic Voltage Restorer), several compensation methods, such as pre-sag compensation, in-phase compensation and minimum-energy compensation, are introduced and their principles are analyzed in phasor diagram. Pre-sag compensation ensures the continuity of load voltage before and after voltage sag, but the amplitude and power of output voltage are out of control. In-phase compensation is simple in calculation and its output voltage amplitude is the smallest, but the phase angle of output voltage is offset and the power out of control. Minimum-energy compensation optimizes the output power, but the amplitude of output voltage is bigger and the phase angle offset. The optimal compensation method is proposed, which integrates the advantages of three methods above-mentioned to find the optimal compensation point according to different sag conditions. DVR applying the optimal compensation method saves the energy stored at DC side, extends the compensation time and avoids the danger of over-voltage at DC side caused by the energy feedback to DVR when system voltage rises. Simulation results verify the effectiveness of the presented compensation method.

Key words: dynamic voltage restorer; control strategy; voltage sag; compensation arithmetic