

基于超级电容器储能的电压暂降补偿分析

钟 云^{1,2},张建成¹

(1. 华北电力大学 电力系,河北 保定 071003;
2. 南昌大学 信息工程学院,江西 南昌 330029)

摘要:就动态电压恢复器和配电静止同步补偿器对电压暂降的补偿技术进行了详细的计算分析,分别通过注入最小电压和注入最小电流确定了装置的最小补偿容量,从而方便装置的设计和控制。同时分析表明,在考虑极端情况即没有超级电容器储能单元时,电压暂降的补偿并不总能实现,因此采用超级电容器作为储能单元的动态电压恢复器和配电静止同步补偿器在提高电能质量方面有重要作用。

关键词:电压暂降; 电能质量; 动态电压恢复器; 配电静止同步补偿器; 超级电容器

中图分类号: TM 714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)06-0043-03

电压暂降,也称电压降落或电压凹陷或电压下跌,是最为普遍、危害最大的动态电能质量问题。抑制电压暂降的措施^[1],就缓解装置方面而言,动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer)^[2]和配电静止同步补偿器 D-STATCOM(Distribution system STATic synchronous COMPensator)是配电系统中两种主要补偿装置。这两种装置都能产生和吸收无功功率,但是要产生有功功率的补偿就需要有储能单元,若该储能单元补偿功率足够大,即使供电完全中断,也可以给负载提供所需的功率,保证供电的连续^[3]。

本文就采用超级电容器作为储能单元的电压暂降补偿装置 DVR 和 D-STATCOM 进行了分析,明确了采用储能单元的必要性,并确定出两种装置的最小补偿容量,对于 DVR 和 D-STATCOM 装置的设计

与研究具有重要作用。

1 DVR 对电压暂降的补偿分析

典型的串联型 DVR 如图 1 所示,一边接无穷大系统,一边接负荷。

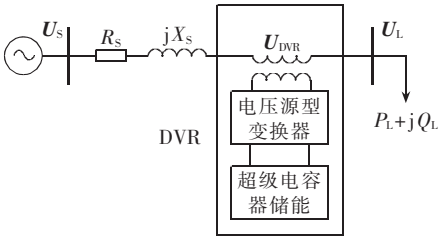


图 1 DVR 电路图
Fig.1 The circuitry of DVR

当发生电压暂降时,DVR 通过串联变压器在电路中叠加 U_{DVR} ,以保持负荷电压 U_L 幅值不变^[4]。

由图 1 可得方程:

收稿日期:2004-12-20;修回日期:2005-03-11
基金项目:国家电力公司纵向科技项目(SP11-2002-01-09);
华北电力大学博士学位教师科研基金(93101002)

$$U_{DVR} = U_L + Z_S I_L - U_S \quad (1)$$

$$I_L = \left(\frac{P_L + jQ_L}{U_L} \right)^* \quad (2)$$

以 U_L 为基准,将式(1)展开得:

$$U_{DVR} \angle \alpha = U_L \angle 0 + Z_S I_L \angle (\beta - \phi) - U_S \angle \delta \quad (3)$$

式中 α 为 U_{DVR} 的幅角; β 为 Z_S 的幅角; δ 为 U_S 的幅角; $\phi = \arctan(Q_L/P_L)$ 。

则此 DVR 的容量为

$$S_{DVR} = U_{DVR} I_L^* \quad (4)$$

根据式(3)可画出对应的相量图,如图 2 所示。

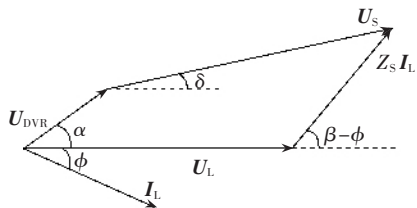


图 2 DVR 的相量图

Fig.2 The phasor diagram of DVR

则 DVR 补偿的电压幅值为

$$U_{DVR}^2 = U_L^2 + U_S^2 + Z_S^2 I_L^2 + 2U_L Z_S I_L \cos(\beta - \phi) - 2U_S Z_S I_L \cos(\beta - \phi - \delta) - 2U_L U_S \cos \delta \quad (5)$$

对于给定的负荷电流,要获得最小容量,需要电压取得最小,此时应满足:

$$\partial U_{DVR}^2 / \partial \delta = 0 \quad (6)$$

求解式(6)得:

$$\delta = \arctan \left[\frac{Z_S I_L \sin(\beta - \phi)}{U_L + Z_S I_L \cos(\beta - \phi)} \right] \quad (7)$$

则根据已知条件,可计算出 δ ,再将 δ 值分别代入式(3)和(4),就可得到串联型 DVR 的最小注入电压和最小容量。

考虑极端情况,如果没有超级电容器储能单元,DVR 只补偿无功功率,此时应满足:

$$\alpha = \pi / 2 - \phi \quad (8)$$

代入式(3)得:

$$\delta = \arccos \left(\frac{U_L \cos \phi + Z_S I_L \cos \beta}{U_S} \right) - \phi \quad (9)$$

而要满足这个等式,就必须满足:

$$U_S \geq U_L \cos \phi + Z_S I_L \cos \beta \quad (10)$$

可以看出通过纯无功方式补偿电压暂降并不总是能够实现,因此,补偿方案应将储能设备的容量与逆变器主回路设备的容量结合起来。采用超级电容器作为储能单元,可以获得在技术和经济上都比较合理的方案。

2 D-STATCOM 对电压暂降的补偿分析

D-STATCOM 实际上是一种并联型动态电压调节器,典型的 D-STATCOM 如图 3 所示,可以看到,D-STATCOM 并联在无穷大系统和负荷之间。

当发生电压暂降时,D-STATCOM 通过并联变压器在电路中注入 I_D ,在系统阻抗上产生压降,以保

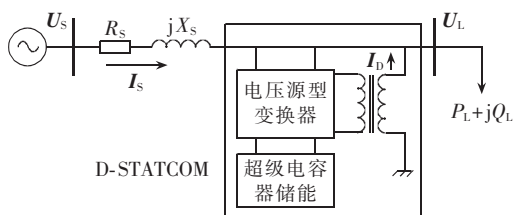


图 3 D-STATCOM 电路图

Fig.3 The circuitry of D-STATCOM

持负荷电压 U_L 幅值不变^[5]。

由图 3 可得:

$$I_D = I_L - I_S = I_L - \frac{U_S - U_L}{Z_S} \quad (11)$$

以 U_L 为基准,将式(11)展开得:

$$I_D \angle \theta = (I_L \angle -\phi) - \frac{U_S}{Z_S} \angle (\delta - \beta) + \frac{U_L}{Z_S} \angle -\beta \quad (12)$$

式中 θ 为 I_D 的幅角; β 为 Z_S 的幅角; δ 为 U_S 的幅角; $\phi = \arctan(Q_L/P_L)$ 。

则此 D-STATCOM 的容量为

$$S_D = U_L I_D^* \quad (13)$$

根据式(12)可画出对应的相量图,如图 4 所示。

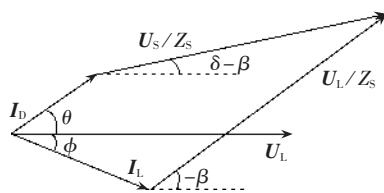


图 4 D-STATCOM 的相量图

Fig.4 The phasor diagram of D-STATCOM

则 D-STATCOM 注入的电流幅值为

$$I_D^2 = I_L^2 + \frac{U_S^2}{Z_S^2} + \frac{U_L^2}{Z_S^2} + 2 \frac{U_L I_L}{Z_S} \cos(\phi + \beta) - 2 \frac{U_S I_L}{Z_S} \cos(\delta - \beta + \phi) - 2 \frac{U_S U_L}{Z_S^2} \cos \delta \quad (14)$$

D-STATCOM 要取得最小容量,需要电流取得最小,此时应满足:

$$\partial I_D^2 / \partial \delta = 0 \quad (15)$$

求解式(15)得:

$$\delta = \arctan \left[\frac{Z_S I_L \sin(\beta - \phi)}{U_L + Z_S I_L \cos(\beta - \phi)} \right] \quad (16)$$

根据已知条件,可计算出 δ ,再将 δ 值分别代入式(12)和(13),就可得到 D-STATCOM 的最小注入电流和最小容量。

考虑极端情况,如果没有超级电容器储能单元,D-STATCOM 只补偿无功功率,此时负载的有功功率 P_L 全由无穷大系统提供,则有

$$P_L = \frac{U_S U_L}{Z_S} \cos(\beta - \delta) - \frac{U_L^2}{Z_S} \cos \beta \quad (17)$$

解式(17)得:

$$\delta = \beta - \arccos \left(\frac{U_L}{U_S} \cos \beta + \frac{Z_S P_L}{U_S U_L} \right) \quad (18)$$

而要满足这个等式,就必须满足:

$$U_s \geq U_L \cos \beta + Z_s P_L / U_L \tag{19}$$

同样可以看到,只通过纯无功方式补偿电压暂降并不是总能够实现,从而说明增加使用超级电容器作为储能单元非常必要。

3 结论

本文就动态电能质量问题中电压暂降的补偿措施进行了介绍,并详细分析了 DVR 和 D-STATCOM 两种补偿装置对电压暂降的补偿原理,确定了两种装置的最小补偿容量,对于 DVR 和 D-STATCOM 装置的设计与研究具有重要的作用。同时明确了采用储能单元的必要性。超级电容器是一种性能优越的储能元件,基于超级电容器的 DVR 和 D-STATCOM 装置不仅具有优异的电能质量控制性能,而且在经济上也会越来越合理。

参考文献:

[1] 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 Hong-geng,XIAO Xian-yong,LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part 3: Voltage sags in power system[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(12):1-4.
[2] 张秀娟,李小萌,姜齐荣,等. 动态电压调节器(DVR)的设计与性能测试[J]. 电力电子技术,2004,38(2):21-23.
ZHANG Xiu-juan,LI Xiao-meng,JIANG Qi-rong,*et al.* Main circuit design and performance tests of dynamic voltage regulator[J]. **Power Electronics**,2004,38(2):21-23.
[3] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社,2004.
[4] HAQUE M H. Compensation of distribution system vol-

tage sag by DVR and D-STATCOM [A]. **IEEE Porto Power Tech. Conference**[C]. Porto,Portugal:IEEE Pub, 2001. 1-5.
[5] STEURER M,ECKROAD S. Voltage control performance enhancement by adding energy storage to shunt connected voltage source converters [A]. **IEEE Harmonics and Quality of Power**[C]. Rio de Janeiro,Brazil:IEEE Pub, 2002. 590-594.
[6] 张建成,黄立培,陈志业. 飞轮储能系统及其运行控制技术[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):108-111.
ZHANG Jian-cheng,HUANG Li-pei,CHEN Zhi-ye. Research on flywheel energy storage system and its controlling technique [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003,23(3):108-111.
[7] 林海雪. 电力系统中电压暂降和短时断电 [J]. 供用电, 2002,19(1):9-12.
LIN Hai-xue. Voltage dip and short supply interruption in power system[J]. **Distribution & Utilization**,2002,19(1): 9-12.
[8] 王宝安,蒋 平,刘成民. 电能质量综合补偿器补偿电压降落和浪涌的新策略[J]. 电力系统自动化学报,2003,15(4):19-23.
WANG Bao-an,JIANG Ping,LIU Cheng-min. A new strategy of unified power quality compensator compensating for voltage sags and swells[J]. **Proceedings of the EPSA**, 2003,15(4):19-23.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

钟 云(1976-),女,江西南昌人,硕士研究生,主要从事电能质量控制方面研究(E-mail:powerquality@163.com);
张建成(1965-),男,河北深县人,副教授,博士后,主要研究电能质量控制、电力电子技术在电力系统中的应用。

Analysis of voltage sag compensation based on energy storage of super capacitor

ZHONG Yun^{1,2},ZHANG Jian-cheng¹

(1.North China Electric Power University,Baoding 071003,China;

2.Nanchang University,Nanchang 330029,China)

Abstract: The compensating techniques of voltage sag by DVR (Dynamic Voltage Restorer) and D-STATCOM(Distribution system STATic synchronous COMPensator) are analyzed and calculated in detail,and the minimum compensation capacity is determined respectively by minimum voltage injection and minimum current injection,which simplifies the design and control of device. The analysis also shows that the compensation of voltage sag is not always practical with the extreme case of without super capacitors. DVR and D-STATCOM with super capacitors as their energy storages can play an important role in power quality improvement.

This project is supported by Portrait Sci.and Tech.Project of State Grid Corp of China (SP11-2002-01-09)and the Doctoral Teacher Research Fund of North China Electric Power University(93101002).

Key words: voltage sag; power quality; DVR; D-STATCOM; super capacitor