

实现动态电压恢复器可靠 与经济运行的方法

陈 勇, 陈近操

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 直流电容器上所存储的能量大小直接决定了动态电压恢复器(DVR)对电压跌落补偿的能力。提出了一种新颖的多 DVR 共用直流电容的方法, 共用电容可以在补偿电压跌落的同时进行能量的补充, 省去了为给电容补充能量而专门配制的整流设备, 节约了 DVR 成本。对 DVR 控制电压跌落的策略进行了分析, 结果表明在使用最小能量补偿法时, 这种方法能可靠补偿线路深度、长时间的电压跌落。仿真表明了结果的正确性。

关键词: 电压跌落; DVR; 公用直流电容; 最小能量补偿

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)02-0089-03

0 引言

动态电压恢复器(DVR)应用较为广泛, 它是一种串联型的电压补偿装置, 能够补偿系统电压的畸变部分, 具有很好的补偿效率。DVR 串联在敏感负荷上, 发生电压跌落时, 带脉冲宽度调制功能的直流-交流逆变器会合成一个幅值、频率和波形受控的电压, 经过串联变压器将这个电压加到线路电压上, 可以在 1/4 周期内对电压跌落作出反应。提供电压提升的能量是由直流电容器供给的。在电压跌落时, 电容器为逆变器提供直流能量, 逆变器将其合成为一个幅值、波形、相角及持续时间满足补偿要求的交流电压。在补偿时, 能量不是来自系统。正常运行时, 电容器通过逆变器由系统充电。

显而易见, DVR 能对电压跌落进行补偿, 是由于直流电容器可以提供能量给逆变器的缘故, 因此, 直流电容器上所存储的能量大小直接决定了 DVR 对电压跌落补偿的能力。目前, 使用 DVR 装置, 对直流电容器上能量, 一种是直接采用储能装置, 这样做可以节省 DVR 开支, 但是补偿能力有限, 对比较深的电压跌落或持续时间比较长的跌落无法可靠补偿。另外一种是通过整流装置持续给直流电容器充电, 保证可以进行持续的电压跌落补偿, 也可以对深度电压跌落进行补偿, 但这提高了系统的复杂程度, 更提高了造价, 本文介绍一种可以兼顾经济和补偿能力的方法。

对于用户端一条馈线上安装一个 DVR, 也就是一条馈线上会有一个直流电容器(只考虑电压跌落情况), 本文采取多条馈线共用一个直流电容器的方法。在实际情况下, 通过共用直流电容器相连的馈线(以两条馈线为例), 当一条馈线发生电压波动, 由于馈线之间的电气距离, 另外一条正常工作的馈线受

到的电压波动影响可以忽略^[1], 因此, 对于通过共用直流电容器相连的多馈线系统, 直流电容器一方面可以对发生电压跌落的馈线提供能量, 进行电压补偿, 另一方面正常工作的馈线通过换流器对电容进行能量补充, 这样做既保证了能可靠地补偿馈线系统的电压跌落, 又经济地使用了 DVR。

1 系统模型的建立

上述 2 馈线系统如图 1 所示。

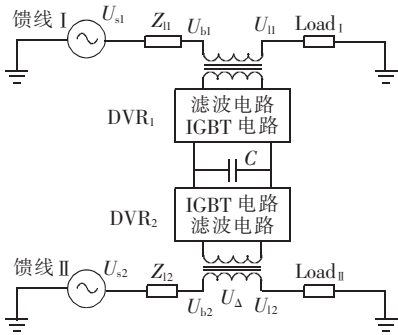


图 1 DVR 公用直流电容的两馈线系统
Fig.1 A two-feeder system with a common capacitor shared by two DVRs

电压分别为 U_{s1} 和 U_{s2} , 当馈线 I 上发生电压跌落时, DVR₁ 在补偿跌落电压的同时必须控制 DVR₂ 向电容补充有功, 同时对于正常工作的馈线 II, 负载上的电压应该等于 U_{l2} , 因此在实施控制策略时必须保证馈线 II 既能向电容补偿有功又可以维持负载 II 电压幅值不变^[1]。显然, 通过 DVR₂ 向电容补偿的有功应该等于电容向馈线 I 提供的功率与线路损耗之和。在保证馈线 II 上电压恒定时, DVR₂ 从馈线 II 上获得的电压向量见图 2^[2]。

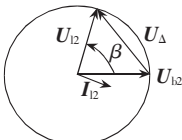


图 2 DVR₂ 上获得的电压向量图
Fig.2 Voltage vectors of DVR₂

由图 2 可以看出,电压 U_{Δ} 是由 U_{l2} 超前 U_{l1} 的相角 β 决定的,馈线 II 提供的功率为

$$P_{\Delta} = 3U_{l2} I_{l2} \cos(\phi_2 - \beta) - 3U_{l2} I_{l2} \cos \phi_2 \quad (1)$$

由于 $U_{l2} = U_{l1}$ 所以有

$$P_{\Delta} = S_{l2} [\cos(\phi_2 - \beta) - \cos \phi_2] \quad (2)$$

对于 P_{Δ} ,也可以写成 DVR_I 所耗的功率 P_{DVR1} 与线路损耗功率 P_1 和的形式^[3],即

$$P_{\Delta} = P_{DVR1} + P_1 \quad (3)$$

由式(2)(3)可以得到:

$$\beta = \phi_2 - \arccos \left[\frac{P_{DVR1} + P_1}{S_{l2}} + \cos \phi_2 \right] \quad (4)$$

由于负载视在功率及阻抗角 ϕ_2 都是确定的,因此馈线 II 提供给直流电容的能量 P_{Δ} 是由 β 确定的,显然 $P_{\Delta \max} = S_{l2} (1 - \cos \phi_2)$,此时即有 $\beta_{\max} = \phi_2$ 。由式(4)可知, β 主要是由 DVR_I 上所耗的功率 P_{DVR1} 决定的,而采用的电压跌落补偿技术则决定了 P_{DVR1} 的大小^[4]。目前,采用的技术有同相电压补偿法,跌落前电压补偿法以及最小能量补偿法等^[5],以下根据所采用的补偿技术讨论馈线 II 可以补偿馈线 I 电压跌落的深度。

2 电压跌落补偿技术对系统补偿跌落深度的分析

2.1 跌落前电压补偿法

图 3 是采用跌落前电压补偿法的向量图^[6],对负载 1,由 DVR_I 提供的有功功率为^[1]

$$P_{DVR1} = U_{l1} I_{l1} [3 \cos \phi_1 - K \cos(\phi_1 + \theta)] \quad (5)$$

$$K = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\theta = \arctan(Y/X)$$

式中 $X = \sum_{\delta=1}^3 a_j \cos \delta_j$; $Y = \sum_{\delta=1}^3 a_j \sin \delta_j$; $a_j = U_{slj}/U_{l1}$ 为各

相相对于负载电压 U_{l1} 的跌落因子; δ_j 为各相的相角跳变。

对于一个电压跌落深度为 a ,相角跳变为 δ 的对称三相电压跌落,由式(4)(5)可以得到:

$$\beta = \phi_2 - \arccos \{ [S_{l1} (\cos \phi_1 - a \cos \phi_1 (\phi_1 + \delta)) + P_1] / S_{l1} + \cos \phi_2 \} \quad (6)$$

为了得到 $P_{\Delta \max}$,要求

$$a = \frac{S_{l1} \cos \phi_1 + P_1 - S_{l2} (1 - \cos \phi_2)}{S_{l1} \cos(\phi_1 + \delta)}$$

例如,对于负载相同、功率因数也相同的 2 条馈线,线路损耗功率 $P_1 = 3\% S_{l2}$,则 $\alpha = \frac{2 \cos \phi - 0.97}{\cos(\phi + \delta)}$ 。

由上述分析可知,对于用跌落前电压补偿法这种补偿技术,馈线 II 可以补偿馈线 I 的电压跌落深度不仅和功率因数有关,还与电压跌落时的相角跳

变有关,例如当功率因数为 0.8,相位跳变角为 0 时, $a \approx 0.86$,这说明在这种情况下馈线 II 最多可以补偿馈线 I 的 14% 电压跌落。对于功率因数一定的系统,当 δ 正的越大, a 就越大,馈线 II 能补偿的深度就越小;反之 δ 负的越多, a 就越小,馈线 II 能补偿的深度就越大。由于 δ 的不确定性,因此在用这种补偿法补偿时。馈线 II 所能补偿馈线 I 的深度也是不确定的,唯一可以确定的是 $a \geq 2 \cos \phi - 0.97$ 。

2.2 最小能量补偿法

采用最小能量补偿法,能使 DVR 输出的能量达到最小,其原理如图 4 所示^[9]。这个最小的能量是由角 α 确定的,对图 1 所示系统, $P_{DVR1 \min} = S_{l1} [\cos \phi_1 - \frac{K}{3}]$,此时 $\alpha = \phi_1 + \theta$ ^[5]。

对于一个对称三相电压跌落,电压跌落因子为 a ,相角跳变为 δ , $K = 3a$,可以求出 β :

$$\beta = \phi_2 - \arccos \left[\frac{S_{l1} (\cos \phi_1 - a) + P_1}{S_{l2}} + \cos \phi_2 \right] \quad (7)$$

为了得到 $P_{\Delta \max}$,要求

$$a = \frac{S_{l1} \cos \phi_1 + P_1 - S_{l2} (1 - \cos \phi_2)}{S_{l1}}$$

对于负载相同、功率因数也相同的两条馈线,线路损耗功率 $P_1 = 3\% S_{l2}$,则 $a = 2 \cos \phi_1 - 0.97$ 。可见,采用最小能量补偿法,电压跌落因子 a 的大小只和馈线 I 的功率因数有关,而与相角跳变 δ 无关。当馈线 I 的功率因数为 0.8 时, $a = 0.63$,即此时馈线 II 可以补偿馈线 I 的 37% 电压跌落深度。显然,这比采用跌落前电压补偿法所能补偿的跌落深度大很多。因此,对于本文提出的公用直流电容的多馈线系统,DVR 采用最小能量补偿法进行电压跌落补偿。

3 仿真

对图 1 所示的两馈线系统进行仿真,两条馈线的电压分别是 6.6 kV 和 10 kV,功率因数都为 0.85。以 A 相为例,图 5 是馈线 I 上 A 相供电电压,图 6 是馈线 I 上 A 相负载电压,图 7 是公用直流电容上的电压,图 8 是馈线 II 上 A 相的负载电压,电压跌落深度为 40%。

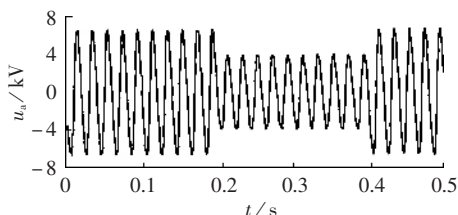


图 5 馈线 I 的 A 相电压

Fig.5 Voltage of phase A of feed I

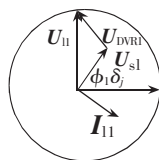


图 4 采用最小能量补偿法的向量图

Fig.4 Vector diagram with minimal energy compensation

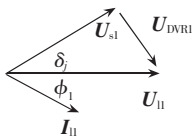


图 3 采用跌落前电压补偿法的向量图

Fig.3 Vector diagram with voltage-before-sag compensation

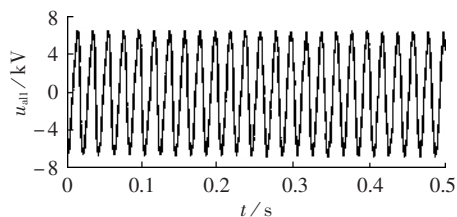


图 6 馈线 I 的 A 相负载电压

Fig.6 Load voltage of phase A of feed I

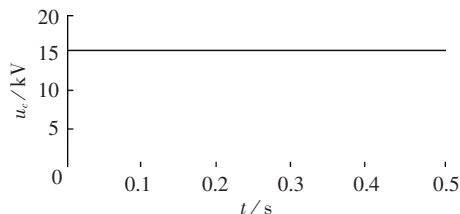


图 7 共用直流电容上的电压

Fig.7 Voltage of common DC capacitor

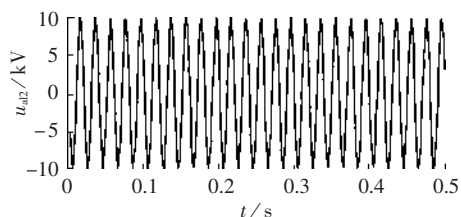


图 8 馈线 II 的 A 相负载电压

Fig.8 Load voltage of phase A of feed II

4 结语

直流电容器上所存储的能量大小直接决定了 DVR 对电压跌落补偿的能力,本文提出了一种新颖的利用 DVR 的方法,并对 DVR 控制电压跌落的策略进行了分析,结果表明在使用最小能量补偿法时,这种方法能可靠地补偿线路深度、长时间的电压跌落,并且由于共用电容可以在补偿电压跌落的同时进行能量的补充,省去了为给电容补充能量而专门配制的整流设备,大大节约了 DVR 的成本。仿真表明了结果的正确性。

参考文献:

- [1] VILATHGAMUWA M,WIJEKON H M,CHOI S S. Inter-line dynamic voltage restorer;a novel and economical approach for multi-line power quality compensation[J].

IEEE Transactions on Power Delivery,2004,17(5): 833-840.

- [2] 彭春萍,陈允平,孙建军. 动态电压恢复器及其检测方法的探讨[J]. 电力自动化设备,2003,23(1):68-71.
PENG Chun-ping,CHEN Yun-ping,SUN Jian-jun. Study of dynamic voltage restorer and its detecting method[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(1): 68-71.
- [3] VILATHGAMUWA M,WIJEKON H M. Control and analysis of a new dynamic voltage restorer circuit topology for mitigating long duration voltage sags [C]// Proceedings of 37th Annual Meeting of IEEE Industry Application Society. Pittsburgh, USA: IEEE, 2002:1105-1112.
- [4] 谢旭,胡明亮,梁旭,等. 动态电压恢复器的补偿特性和控制目标[J]. 电力系统自动化,2002,26(8):41-44.
XIE Xu,HU Ming-liang,LIANG Xu,et al. Compensation range and control object of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(8): 41-44.
- [5] 冯晓明,杨仁刚. 动态电压恢复器补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(6):68-72.
FENG Xiao-ming,YANG Ren-gang. Analysis of voltage compensation strategies for dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(6): 68-72.
- [6] VILATHGAMUWA M,PERERA A A D,CHOI S S. Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current mode control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004, 17(5):824-829.
- [7] 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.
- [8] 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.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

陈 勇(1982-),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail:cygo1@163.com);
陈近操(1956-),男,江苏南京人,教授,主要从事电力系统运行控制方面的研究。

Method for reliable and economical operation of DVR

CHEN Yong,CHEN Jin-cai

(Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China)

Abstract: The energy stored in DC capacitor decides the compensation performance of DVR (Dynamic Voltage Restorer) on voltage sag. A method using a common DC capacitor shared by multi DVRs is presented,which can compensate the voltage sag and complement the energy at the same time. No more special rectifiers are needed. The control strategy of DVR for voltage sag is analyzed,and the minimal energy compensation method is found to be reliable and effective for deep and long-duration voltage sags. Simulations verify its correctness.

Key words: voltage sag; DVR; common DC capacitor; minimal energy compensation