

双 DVR 协同补偿的运行模式研究

贾东强, 韦统振, 霍群海, 齐智平

(中国科学院 电工研究所, 北京 100190)

摘要: 为满足动态电压恢复器(DVR)大容量、高可靠性和灵活性的要求,采用变流装置串、并联这一有效手段,借鉴有源电力滤波器(APF)、配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)等并联研究的相关成果,探讨适合多个 DVR 装置串联的拓扑结构和控制方法。提出了集中控制方式和分散控制方式,并进一步细分为 5 种运行模式,其中集中控制方式又细分为按容量比分配、按各自容量限幅分配以及按各自功能分配补偿电压的 3 种运行模式,分散控制方式又细分为均分参考补偿电压和以容量限幅分配参考补偿电压 2 种运行模式。以均分参考电压的分散控制模式为例,分析可知双 DVR 在该种联合运行模式下与单台 DVR 独立运行 2 种工作方式的特性类似。仿真结果表明,所提出的 5 种运行模式均具有良好的可行性。

关键词: 双 DVR 结构; 串联; 电压跌落; 电压谐波; 集中控制; 分散控制; 运行模式; 补偿; 拓扑

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.014

0 引言

目前,配电网中各种敏感负荷对电能质量的要求越来越高,电网侧发生的电压暂降、波动、闪变、谐波等电能质量问题对用户造成了巨大的经济损失^[1-3]。在电网侧安装串联型补偿装置(如动态电压恢复器(DVR))是解决此类电能质量问题的有效方案^[4]。

随着社会的发展,敏感负荷迅速增多,容量也越来越大,电压等级也越来越高,这使得 DVR 朝着大容量、高压、高可靠性、高灵活性的方向发展。在电力电子领域,变流装置的串、并联是实现大容量、高压、高可靠性和灵活性的有效手段之一^[5-6],可以较好地解决器件开关频率与容量之间的矛盾。目前,国内外文献对多个电能质量补偿装置的并联或者串并联应用已有较多研究,如多个有源电力滤波器(APF)、配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)的并联研究^[7-10],DVR 与 DSTATCOM 的串并联联合运行研究^[11-12]等。但对于多个电能质量补偿装置的串联研究还未见相关文献论述。本文拟以 2 台 DVR 协同补偿的运行模式为例,探讨多个电能质量补偿装置串联的拓扑结构、运行方案以及相关的运行特性,分析串联补偿的可靠性和灵活性,并在中高压的工况下对其可行性进行了仿真验证。

1 双 DVR 结构介绍

1.1 双 DVR 结构示意图

双 DVR 拓扑延续了传统单台 DVR 的结构,包括储能单元、逆变单元、滤波器和串联变压器等基本

结构。不同之处在于采用了 2 台 DVR 串联的形式,双 DVR 的基本结构示意图如图 1 所示。

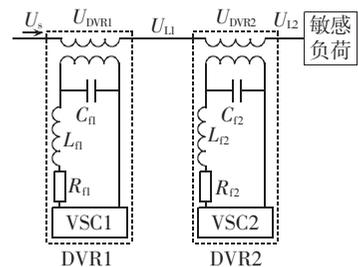


图 1 双 DVR 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of dual-DVR structure

1.2 双 DVR 结构的特点

与传统的各种适用于低压领域的 DVR^[13-15]或者是适用于中高压、大容量场合的单台 DVR^[16-17]相比,本文提出的双 DVR 结构若采用适当的运行模式可具备以下特点。

a. 提高补偿电压可靠性。

如图 1 所示,当采用 2 台 DVR 联合补偿电压时,DVR2 不仅可以扩大 DVR1 的补偿极限,还可作为 DVR1 故障时的替补。当 DVR1 出现故障或者例行检修而需要退出运行时,DVR2 完全可以补偿大部分的电压跌落,从而提高了补偿电压的可靠性。

b. 提高补偿电压灵活性。

当电网侧电压出现跌落、波动、闪变、谐波等电能质量问题时,双 DVR 可依照自身的特点灵活地配置补偿功能,如可使开关频率较低的二台 DVR 补偿电压跌落,开关频率较高的 DVR1 补偿谐波^[18-19]或者波动闪变。若只用 1 台 DVR 实现以上所有补偿功能,则需解决开关频率与容量之间的矛盾,且控制算法较复杂。

2 双 DVR 的运行方案

DVR 可根据不同的场合选择不同的控制策略,

收稿日期:2012-10-16;修回日期:2013-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50807052,51107134)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50807052,51107134)

其中前馈控制策略具有响应速度较快、控制简单等优点。本文拟以双 DVR 均采用前馈控制策略为例,研究其联合运行时的补偿方案。总体而言,补偿方案可分为集中控制与分散控制两大类。

2.1 集中控制

集中控制时双 DVR 共用一套控制器和电压检测模块,针对每台 DVR 发出的补偿电压值由参考电压分配模块进行分配。双 DVR 可采用 3 种运行模式,分别对应不同的补偿电压分配方法。

2.1.1 以双 DVR 的容量比分配补偿电压

双 DVR 共用一套电压检测模块,而各自所需的参考补偿电压则根据它们固有的容量比进行分配,分配示意图如图 2 所示。

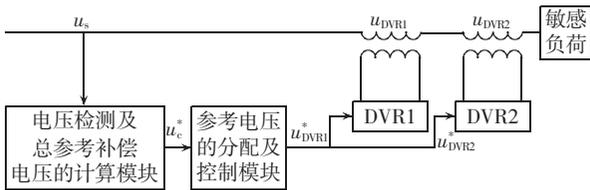


图 2 双 DVR 以容量比分配总参考补偿电压

Fig.2 Overall compensation voltage allocated between two DVRs according to their capacity ratios

此时双 DVR 总参考补偿电压 u_c^* 及容量比 α 可表示为:

$$\begin{cases} u_c^* = u_L^* - u_s \\ \alpha = S_{DVR1} / (S_{DVR1} + S_{DVR2}) \end{cases} \quad (1)$$

其中, S_{DVR1} 、 S_{DVR2} 分别表示 DVR1、DVR2 的容量, u_L^* 为电网侧参考电压值, u_s 为电网侧电压实际检测值。

双 DVR 各自的参考电压满足:

$$\begin{cases} u_{DVR1}^* = \alpha u_c^* \\ u_{DVR2}^* = (1 - \alpha) u_c^* \end{cases} \quad (2)$$

该方法本质上是把 1 台大容量的 DVR 拆分成 2 台小容量的 DVR 并进行协调控制,因此理论上凡单台 DVR 所拥有的所有补偿功能,双 DVR 同样可以实现。

2.1.2 以双 DVR 的容量限幅分配补偿电压

如图 3 所示,此时双 DVR 的补偿功能有主次之分,其中,补偿电压跌落的功能主要由 DVR1 承担, DVR2 则在 DVR1 补偿电压达到限幅时用以扩充

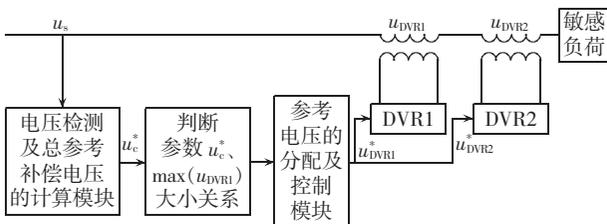


图 3 双 DVR 以其容量限幅分配总参考补偿电压

Fig.3 Overall compensation voltage allocated between two DVRs according to their capacity limitations

DVR1 的补偿范围。

在式(1)条件之下,若双 DVR 总参考补偿电压 u_c^* 大于 DVR1 的补偿极限 $\max(u_{DVR1})$,则有:

$$\begin{cases} u_{DVR1}^* = u_c^* \\ u_{DVR2}^* = 0 \end{cases} \quad (3)$$

反之,则有:

$$\begin{cases} u_{DVR1}^* = \max(u_{DVR1}) \\ u_{DVR2}^* = u_c^* - \max(u_{DVR1}) \end{cases} \quad (4)$$

例如,如果要求双 DVR 总的补偿范围是 50%,而经过统计以后发现实际电压跌落 10%~25% 的概率在 75% 以上,那么此时 DVR1 的补偿容量可设计为 25%。当发生深度跌落时,DVR2 才投入工作;当电压跌落较少时,只有 DVR1 工作,DVR2 处于旁路运行状态;当 DVR1 出现故障时,DVR2 可作为 DVR1 故障后的替补,用于补偿电压跌落较少时的情况。因此与单台大容量 DVR 独立运行相比,双 DVR 采用该种运行模式时提高了补偿的可靠性。

2.1.3 以双 DVR 不同的补偿功能分配补偿电压

如图 4 所示,该种运行模式主要考虑了电网侧出现电压谐波等电能质量问题时的补偿需求,此时单台 DVR 的电力电子器件通常需要较高的开关频率,与其较大的容量需求相矛盾。为了解决开关器件容量和频率之间的矛盾,可采用 2 台开关频率不同的 DVR 分别补偿不同的电能质量问题。其中 DVR1 容量小但开关频率较高,主要用于补偿电网侧出现的电压谐波;DVR2 容量大但开关频率较低,主要补偿电网侧出现的电压跌落,两者联合运行时需一定的协调配合。由集中控制单元计算、分离得到总参考补偿相电压 u_c^* 的谐波分量 u_{c1}^* 与基波分量 u_{c2}^* ,分别作为 DVR1、DVR2 的参考补偿电压,则有:

$$\begin{cases} u_c^* = u_{c1}^* + u_{c2}^* \\ u_{DVR1}^* = u_{c1}^* \\ u_{DVR2}^* = u_{c2}^* \end{cases} \quad (5)$$

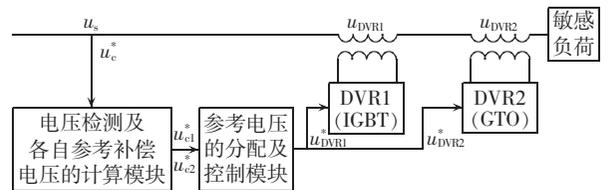


图 4 双 DVR 以不同的补偿功能分配参考补偿电压
Fig.4 Reference voltage allocated between two DVRs according to different compensation functions

该种运行模式的优点在于 2 台 DVR 可以根据自身的特点,灵活选择开关器件和开关频率,以提高总体运行效率。

2.2 分散控制

在分散控制模式下,每台 DVR 均含有采样电路

和控制器,各自的硬件控制电路和软件控制电路相互独立。DVR1、DVR2 均只检测各自安装点的电压,两者之间无需通信。根据各自补偿电压选取方式的不同,双 DVR 可采用以下 2 种运行模式。

2.2.1 均分参考补偿电压的运行模式

2 台 DVR 采用完全相同的模块,分别用于补偿 50% 的负载跌落。如图 5 所示,DVR1 的参考补偿电压为双 DVR 总参考补偿电压的 1/2;而 DVR2 的参考补偿电压为其检测电压与负载端参考电压的差值,即有:

$$\begin{cases} u_{DVR1}^* = \frac{1}{2}(u_L^* - u_s) \\ u_{DVR2}^* = u_L^* - u_{L1} \end{cases} \quad (6)$$

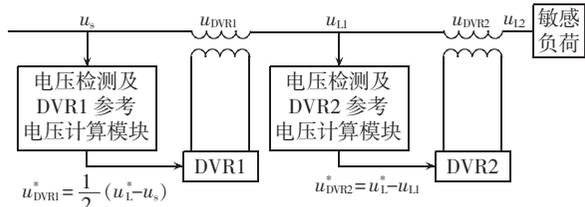


图 5 双 DVR 采用均分参考补偿电压的分散控制模式

Fig.5 Distributed control mode with compensation voltage equally allocated between two DVRs

2.2.2 以自身容量限幅分配补偿电压

如图 6 所示,此时 DVR1 的参考补偿电压即为总参考补偿电压值,如果未超过 DVR1 的补偿能力,则 DVR2 不投入运行;如果超过了 DVR1 的补偿能力,如在 DVR1 运行一段时间后出现补偿电压幅值不足的情况时,DVR2 开始投入运行,负责补偿 DVR1 补偿不足的部分。双 DVR 各自的参考电压为:

$$\begin{cases} u_{DVR1}^* = u_L^* - u_s \\ u_{DVR2}^* = u_L^* - u_{L1} \end{cases} \quad (7)$$

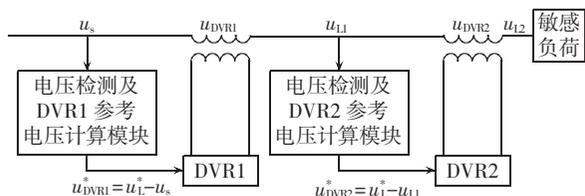


图 6 双 DVR 采用以自身容量限幅的分散控制模式

Fig.6 Distributed control mode with compensation voltage allocated between two DVRs according to their capacity limitations

双 DVR 采用分散控制的优点在于 2 台 DVR 的运行完全独立,所以一台运行故障不会影响另一台

的运行。与单一大容量 DVR 相比,采用分散控制的双 DVR 结构可以提高补偿的可靠性。

3 双 DVR 联合运行的特性分析

为进一步研究双 DVR 联合运行方式的有效性,本文以均分参考电压的分散控制模式为例,对双 DVR 联合运行、单台 DVR 独立运行 2 种工作方式的特性进行比较,分析两者之间的联系,探讨传统适用于单台 DVR 的控制策略在双 DVR 联合运行场合的适用性,同时也为双 DVR 联合运行模式的参数设计提供一种参考。

图 7、8 分别为单台 DVR 独立运行、双 DVR 联合运行的前馈控制框图,虚框表示 DVR 的内部模型。图中参数含义如下: K_m 为逆变器等效增益; R_f 、 L_f 、 C_f 为 DVR 滤波参数; n 为变压器变比; R_z 、 L_z 为负载等效阻抗。

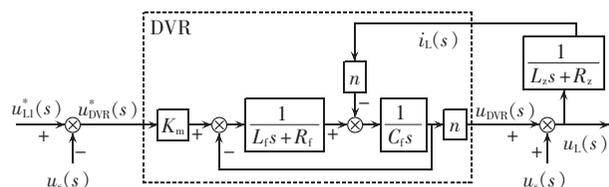


图 7 单台 DVR 前馈控制框图

Fig.7 Block diagram of feedforward control for single DVR

由图 7 可知,经单台 DVR 补偿后的输出电压 u_L 与负载参考电压 u_L^* 、网侧端电压 u_s 以及电网电流 i_L 有关。各变量关系式为:

$$\begin{cases} u_L(s) = G_{01}(s)u_L^*(s) + G_{02}(s)u_s(s) + G_{03}(s)i_L(s) \\ G_{01}(s) = \frac{N_{01}}{D_{01}} \\ G_{02}(s) = \frac{N_{02}}{D_{01}} \\ G_{03}(s) = \frac{N_{03}}{D_{01}} \\ N_{01} = nK_m \\ N_{02} = C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1 - nK_m \\ N_{03} = -n^2 L_f s - n^2 R_f \\ D_{01} = C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1 \end{cases} \quad (8)$$

图 8 中双 DVR 采用了均分参考电压的分散运行模式, u_{L1} 、 u_{L2} 分别为 DVR1、DVR2 补偿后的输出电压。为分析简单起见,本例中双 DVR 均采用了与前述单台 DVR 相同的参数,则可得:

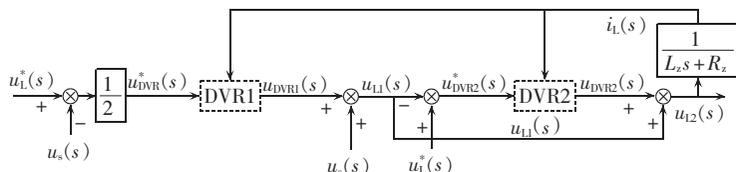


图 8 双 DVR 采用均分参考电压的分散控制框图

Fig.8 Block diagram of distributed control with compensation voltage equally allocated between two DVRs

$$\begin{cases} u_{12}(s) = G_{01}(s)u_{L1}^*(s) + G_{02}(s)u_{L1}(s) + G_{03}(s)i_L(s) \\ u_{L1}(s) = \frac{G_{01}(s)}{2}u_{L1}^*(s) + \frac{1+G_{02}(s)}{2}u_s(s) + G_{03}(s)i_L(s) \end{cases} \quad (10)$$

将 u_{12} 作为双 DVR 联合运行时系统的输出, u_{L1}^* 视为系统的输入, u_s, i_L 视为系统的扰动, 并对式(10)进一步化简, 可得此时系统的输入、扰动与输出之间满足关系式:

$$u_{12}(s) = G_{11}(s)u_{L1}^*(s) + G_{12}(s)u_s(s) + G_{13}(s)i_L(s) \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_{11}(s) = G_{01} \left(1 + \frac{G_{02}}{2} \right) = \frac{N_{01}}{D_{01}} \left(1 + \frac{N_{02}}{2D_{01}} \right) \\ G_{12}(s) = \frac{G_{02}}{2} (1 + G_{02}) = \frac{N_{02}}{2D_{01}} \left(1 + \frac{N_{02}}{D_{01}} \right) \\ G_{13}(s) = G_{03} (1 + G_{02}) = \frac{N_{03}}{D_{01}} \left(1 + \frac{N_{02}}{D_{01}} \right) \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知, 当双 DVR 采用均分参考电压的运行模式时, 虽然此时扰动 u_s, i_L 对系统的特性有一定的影响, 但该影响在每台 DVR 的参数设计中已经得到抑制, 而由 G_{12}, G_{13} 的表达式可知, 上述影响在双 DVR 联合运行时对系统的影响也会被抑制, 因此系统的特性主要由 G_{11} 决定。通过比较 G_{11}, G_{01} 的公式可得如下结论: 双 DVR 采用均分参考电压的联合运行模式与单台大容量 DVR 采用独立运行模式的特性是类似的。

为进一步比较双 DVR 在联合运行的模式下与单台大容量 DVR 在独立运行模式下的补偿效果, 可分别作出 2 种工作方式下负载参考电压到最终输出电压的 Bode 图, 如图 9 所示。相关的参数为: $L_r = 1 \text{ mH}$, $C_r = 30 \text{ } \mu\text{F}$, $R_r = 0.6 \text{ } \Omega$, $K_m = 0.9$, $n = 1$, $R_z = 10 \text{ } \Omega$, $L_z = 0.017 \text{ mH}$ 。

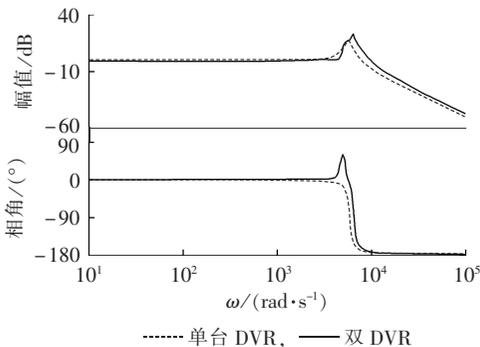


图 9 单台 DVR 独立运行时与双 DVR 采用均分参考电压的联合运行模式时负载参考电压到最终输出电压的 Bode 图

Fig.9 Bode diagram from load reference voltage to final output voltage of independently operating single DVR and that of two coordinated DVRs operating with compensation voltage equally allocated

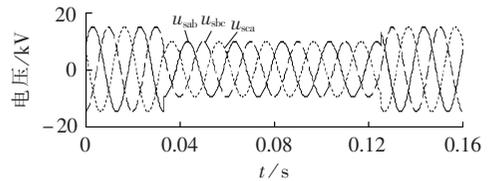
由图 9 可知, 双 DVR 在该种联合运行模式下的补偿效果与单台大容量 DVR 独立运行时的补偿效

果相近, 在低频段系统的输出都能较好地跟踪输入。由于 2 种运行方式均采用前馈控制策略, 所以系统的稳定裕度较小。若采用复合控制策略^[20-22]则可解决系统稳定裕度不足的问题, 也能进一步抑制扰动对系统特性的影响。

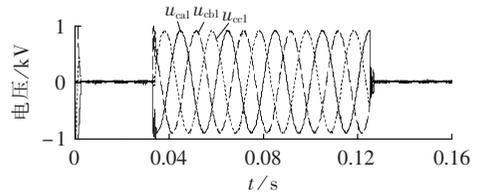
当双 DVR 采用其他联合运行模式时的特性分析方法同上, 这里不再赘述。

4 仿真分析

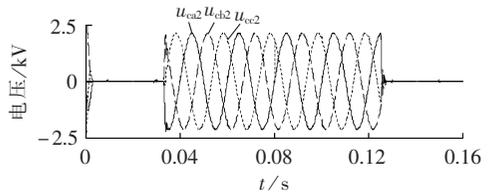
为了对本文提出的适用于双 DVR 集中控制和分散控制的 2 类运行方案在中高压工况下的可行性进行验证, 本文采用 PSIM 软件对每种运行模式进行仿真分析。以三相不平衡阻感性负载作为等效敏感负荷; 双 DVR 采用完全补偿跟踪策略。DVR 通过检测电网侧线电压, 进而可以计算出每相桥臂应补偿的相电压参考值。仿真参数为: 开关频率 $f_{PWM} = 10 \text{ kHz}$, 采样时间 $T_s = 0.05 \text{ ms}$; 三相不平衡负载中 A 相、B 相均为 $20 \text{ } \Omega$ 电阻与 10 mH 电感串联, C 相为 $10 \text{ } \Omega$ 电阻。图 10—14 中各参数所代表含义如下: $u_{sub, sbc, sca}$ 为电



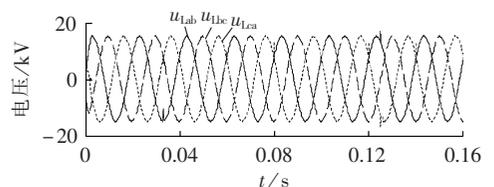
(a) 电网侧三相线电压波形



(b) DVR1 补偿的三相相电压波形



(c) DVR2 补偿的三相相电压波形



(d) 双 DVR 补偿后的负载三相线电压波形

图 10 集中控制模式下双 DVR 以容量比分配总参考电压时的补偿波形

Fig.10 Simulative waveforms of centralized control with overall compensation voltage allocated between two DVRs according to their capacity ratios

网侧三相线电压; $u_{ca1,cb1,cc1}$ 为 DVR1 所补偿的三相相电压; $u_{ca2,cb2,cc2}$ 为 DVR2 所补偿的三相相电压; $u_{sah2,sbc2,sca2}$ 为 DVR1 补偿后的电网侧三相线电压; $u_{lab,lbc,lca}$ 为双 DVR 补偿后的负载三相线电压。

双 DVR 采用集中控制并以其容量比分配总参考电压运行模式的仿真结果如图 10 所示。电网侧三相线电压同时在 0.033 s 跌落了 35%,0.125 s 时恢复正常。在该种运行模式下双 DVR 参考补偿电压之比即为其容量比(本例中为 3:7)。

双 DVR 采用集中控制并以其容量限幅分配总参考电压运行模式的仿真结果如图 11 所示。电网侧三相线电压在 0.033 s 同时跌落了 35%,而 DVR1 与 DVR2 可补偿的最大百分比均为 20%,因此电压跌落已经超出了 DVR1 的补偿极限,此时 2 台 DVR 同时投入运行,并且 DVR1 以其补偿极限补偿 20% 的电网电压跌落,DVR2 则补偿了剩余的 15%。

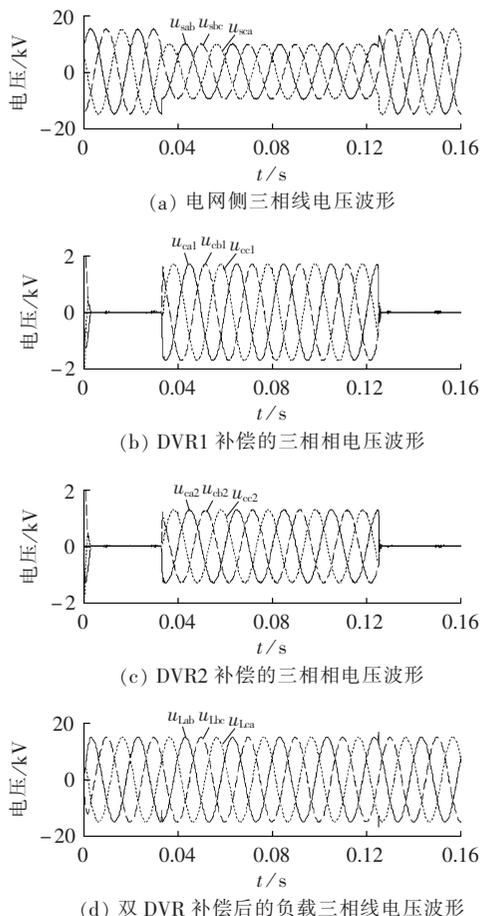


图 11 集中控制模式下双 DVR 以容量限幅分配补偿电压时的补偿波形

Fig.11 Simulative waveforms of centralized control with overall compensation voltage allocated between two DVRs according to their capacity limitations

当电网侧电压存在谐波时,双 DVR 采用集中控制并以不同的功能分配总参考电压运行模式的仿真结果如图 12 所示,DVR1 的开关频率提高为 $f_{PWM} =$

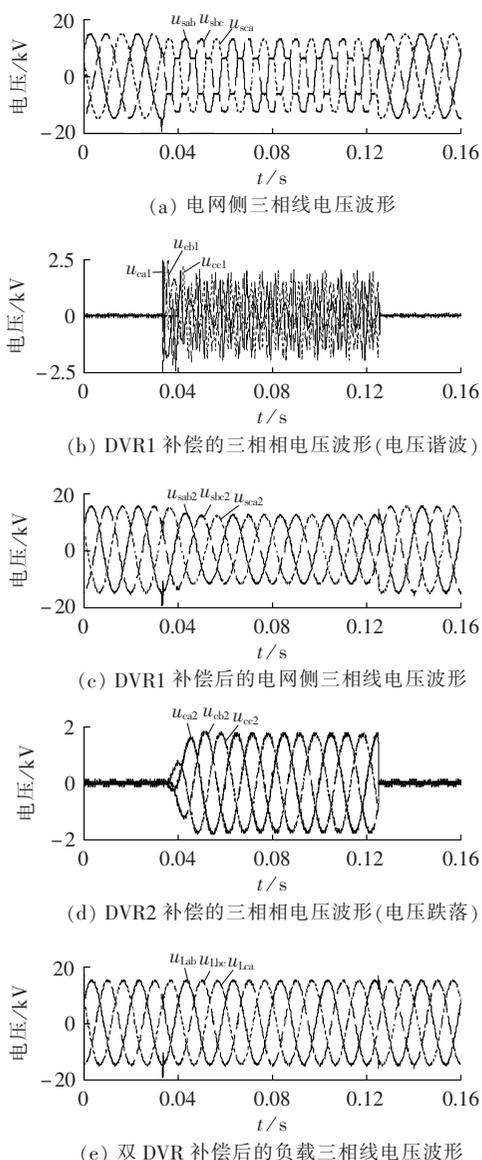


图 12 集中控制模式下双 DVR 以不同的补偿功能分配补偿电压时的补偿波形

Fig.12 Simulative waveforms of centralized control with overall compensation voltage allocated between two DVRs according to their different compensation functions

20 kHz。当电网侧电压同时出现跌落、谐波时,DVR1 补偿电压谐波,DVR2 补偿电压跌落。

其中电网侧线电压在 0.033 s 发生跌落,跌落的百分比为 21%,并且伴随出现 5 次、7 次、11 次等谐波分量,此时双 DVR 通过检测电网侧的线电压并由集中控制单元分离、转化得到应补偿的电压基波分量与谐波分量,分别分配给 2 台 DVR 作为各自应补偿的参考电压值。

双 DVR 采用均分参考补偿电压的分散控制模式补偿电网侧电压跌落的仿真结果如图 13 所示。图中电网侧三相线电压在 0.033 s 同时跌落了 35%,双 DVR 在该种运行模式下各补偿了电压跌落的 50%。

双 DVR 采用以自身容量限幅的分散控制模式

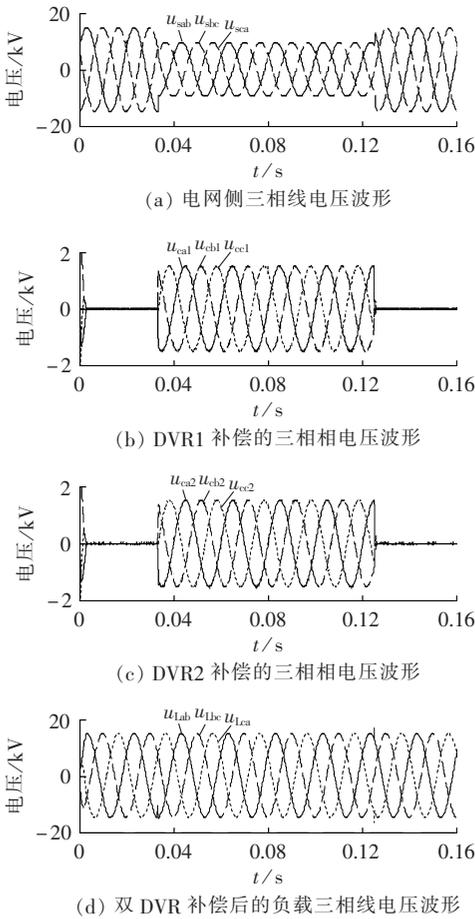


图 13 分散控制模式下双 DVR 采用均分参考补偿电压时的补偿波形

Fig.13 Simulative waveforms of distributed control with compensation voltage equally allocated between two DVRs

补偿电网侧电压跌落的仿真结果如图 14 所示。线电压跌落的百分比仍为 35%,DVR1、DVR2 各自最大的补偿百分比均为 35%。在开始跌落时,DVR1 补偿全部的电压跌落,DVR2 不动作。随着补偿时间的持续增加,DVR1 直流端母线的能量逐渐减小,电压降低,已经难以支撑自身发挥完全补偿的功能,其补偿电压的幅值在 0.048 s 左右开始逐渐衰减,此时 DVR2 开始工作,补偿 DVR1 未完全补偿的跌落电

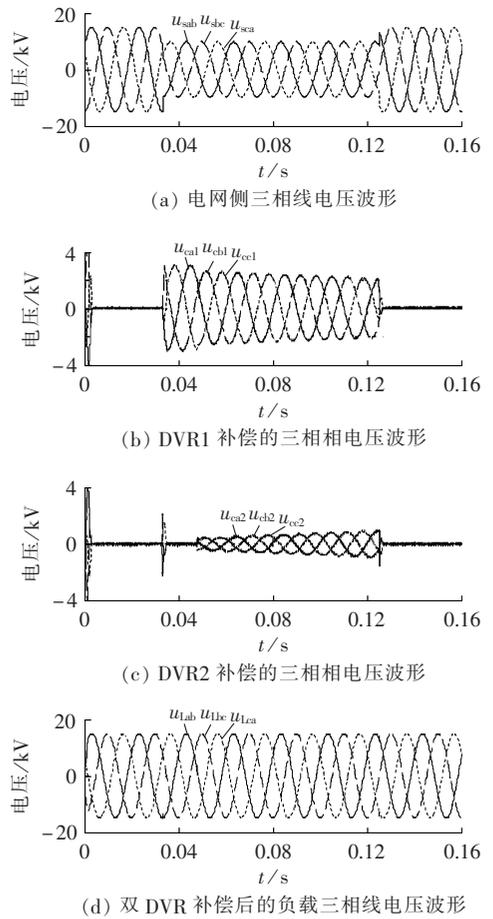


图 14 分散控制模式下双 DVR 采用以自身容量限幅分配补偿电压时的补偿波形

Fig.14 Simulative waveforms of distributed control with compensation voltage allocated between two DVRs according to their capacity limitations

压剩余部分,一直到电网侧电压在 0.125 s 恢复至正常为止。

由以上结果可知;本文提出的适用于双 DVR 集中控制与分散控制的 2 类运行方案即 5 种运行模式均具有较好的可行性,其补偿效果与单一大容量 DVR 采用传统运行模式的补偿效果相近。

表 1 详细地给出了双 DVR 5 种运行模式的补偿特点、补偿功能以及适用场合。

表 1 双 DVR 协同补偿的运行模式
Tab.1 Operating modes of two DVRs with coordinated compensation

双 DVR 运行方案	双 DVR 运行模式	补偿特点	补偿功能	适用场合
集中控制	以容量比分配参考电压	在大功率补偿的情况下,依照 2 台 DVR 自身容量比分配总参考电压	电压跌落	中高压、大容量
	以容量限幅分配参考电压	电压跌落超过 DVR1 的补偿极限时,由 DVR1 以最大补偿极限补偿,DVR2 负责补偿剩余部分	电压跌落	中高压、大容量
	以不同补偿功能分配参考电压	开关频率高的 DVR1 补偿电压谐波,频率较低的 DVR2 补偿电压跌落,提高补偿灵活性	电压跌落、电压谐波	中高压、大容量
分散控制	均分参考电压	首先检测到电压跌落、谐波的 DVR1 只取总参考电压的一半,剩余部分交由 DVR2 检测并补偿	电压跌落、电压谐波	中高压、大容量
	以容量限幅分配参考电压	电压跌落超过 DVR1 的补偿极限时,由 DVR1 以最大补偿极限补偿,DVR2 负责补偿剩余部分	电压跌落	中高压、大容量

5 结论

a. 中高压、大容量场合下,双 DVR 联合补偿时可采用集中控制方案,又可细分为 3 种运行模式。当电网端电压只出现跌落时,可采用以双 DVR 的容量比或者以容量限幅分配参考电压的运行模式,提高补偿的可靠性;当电网端电压既有跌落又有谐波时,可采用以不同的补偿功能分配参考电压的运行模式,解决器件开关频率与容量之间的矛盾,提高补偿的灵活性。

b. 中高压、大容量场合下,双 DVR 联合补偿时也可以采用分散控制方案,又可细分为 2 种运行模式;均分参考电压、以自身容量限幅分配参考电压。2 种运行模式均可以较好地补偿电网端出现的电压跌落等电能质量问题,提高补偿的可靠性。

c. 双 DVR 采用均分参考电压的联合运行模式与单台 DVR 独立运行 2 种工作方式的特性是类似的,传统的前馈控制策略也适用于双 DVR 联合运行的场合。

综上所述,本文提出的适用于双 DVR 结构的 5 种运行模式均具有良好的有效性和可行性,为高压大容量电能质量装置的研究、应用提供了一种新的解决思路。

参考文献:

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术,2001,25(10): 5-12.
LIN Haixue. Main problems of modern power quality[J]. Power System Technology,2001,25(10):5-12.
- [2] 王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术,2004,28(2):56-59.
WANG Bin,PAN Zhencun,XU Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology,2004,28(2): 56-59.
- [3] 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.
- [4] 杨潮,韩英铎,黄瀚,等. 动态电压调节器串联补偿电压的研究[J]. 电力自动化设备,2001,21(5):1-5.
YANG Chao,HAN Yingduo,HUANG Han,et al. Study on series compensating voltage in DVR[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(5):1-5.
- [5] 李勋,戴珂,杨荫福,等. 双变流器串-并联补偿式 UPS 控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):104-108.
LI Xun,DAI Ke,YANG YinFu,et al. Study of control strategy for series-parallel compensated UPS with double converter[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(10):104-108.
- [6] 吕世家. 多模块并联 DC/AC 电力变换技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
LÜ Shijia. Power conversion research of parallel DC/AC converters[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2010.
- [7] SURGEVIL T,VARDAR K,AKPNAR E. Analysis of shunt active power filters using PSCAD for parallel operation[C]//Proceedings of 2009 International Conference on the Electrical and Electronics Engineering. Bursa,Turky:[s.n.],2009:263-267.
- [8] CHIANG S J,CHANG J M. Parallel operation of shunt active power filters with capacity limitation control[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2001,37(4):1312-1320.
- [9] ZHANG Shuquan,DAI Ke,XIE Bin. Parallel control of shunt active power filters with capacity proportion frequency allocation [C]//Proceedings of 2009 International Conference on the Power Electronics and Drive Systems. Taipei,China:[s.n.],2009:127-131.
- [10] WEI Xueliang,DAI Ke,FANG Xin. Parallel control of three-phase three-wire shunt active power filters[C]//Proceedings of the Power Electronics and Motion Control Conference,2006 CES/IEEE 5th International. Shanghai,China:[s.n.],2006:1-5.
- [11] BRENNA M,FARANDA R,TIRONI E. A new proposal for power quality and custom power improvement:OPEN UPQC [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2009,24(4):2107-2116.
- [12] 李勋. 统一电能质量调节器(UPQC)的分析与控制[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
LI Xun. Analysis and control of Unified Power Quality Conditioner(UPQC)[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2006.
- [13] 张秀娟,杨潮,唐志. 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 Xiujuan,YANG Chao,TANG Zhi. The voltage injection analysis in serious power quality controller[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):15-20.
- [14] 王同勋,薛禹胜,CHOI S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(9):101-107.
WANG Tongxun,XUE Yusheng,CHOI S S. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(9):101-107.
- [15] 王凯斐,李彦栋,卓放,等. 一种可持续补偿三相动态电压恢复器的研究[J]. 电力电子技术,2004,38(1):1-3.
WANG Kaifei,LI Yandong,ZHUO Fang,et al. An unremitting dynamic voltage restorer[J]. Power Electronics,2004,38(1):1-3.
- [16] 周雪松,张智勇,马幼捷. 级联动态电压恢复器的研究[J]. 电网技术,2007,31(12):74-77.
ZHOU Xuesong,ZHANG Zhiyong,MA Youjie. Study on inter-line dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology,2007, 31(12):74-77.
- [17] 翟晓萌,赵成勇,李路遥,等. 模块化多电平动态电压恢复器的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(12):86-91.
ZHAI Xiaomeng,ZHAO Chengyong,LI Luyao,et al. Study of modular multilevel dynamic voltage restorer[J]. Power System Protection and Control,2013,41(12):86-91.
- [18] 石游,杨洪耕. 一种带谐波补偿功能的 DVR[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):88-91.
SHI You,YANG Honggeng. Dynamic voltage restorer with harmonic compensation function[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(5):88-91.
- [19] 王建伟,胡晓光,陈松松,等. 具有谐波补偿功能的动态电压恢复器控制策略[J]. 电网技术,2013,37(6):1700-1705.
WANG Jianwei,HU Xiaoguang,CHEN Songsong,et al. A con-

- trol strategy for dynamic voltage restorer with harmonic compensation function[J]. Power System Technology,2013,37(6):1700-1705.
- [20] VILATHGAMUWA M,PERERA A A D R,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,2002,17(5):824-834.
- [21] 王晶,徐爱亲,翁国庆,等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(1):145-151.
WANG Jing,XU Aiqin,WENG Guoqing,et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System Protection and Control,2010,38(1):145-151.
- [22] 袁性忠,姜新建,黄宇淇. 动态电压恢复器的复合控制策略[J].

电力系统自动化,2006,30(19):61-64.

YUAN Xingzhong,JIANG Xinjian,HUANG Yuqi. Compound control strategy of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(19):61-64.

作者简介:

贾东强(1986-),男,甘肃白银人,博士研究生,从事 DFACTS 装置方面的研究(E-mail:jdq@mail.iee.ac.cn);

韦统振(1976-),男,山东菏泽人,副研究员,博士,主要从事分布式发电与储能方面的研究;

霍群海(1981-),男,河南汝南人,助理研究员,博士,主要从事电能质量控制及 DFACTS 装置方面的研究。

Operating modes with dual-DVR coordinated compensation

JIA Dongqiang,WEI Tongzhen,HUO Qunhai,QI Zhiping

(Institute of Electrical Engineering,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China)

Abstract: The effective technology of series-parallel connection is applied to meet the requirement of DVR (Dynamic Voltage Restorer) for large-capacity,high-reliability and flexibility,and the topological structure and control method of multiple series-connected DVRs are discussed based on the research results of parallel operating APFs and DSTATCOMs. Both centralized control and distributed control are presented and five operating modes are suggested. Three operating modes are applicable for centralized control;the compensation voltage is allocated according to capacity ratio,capacity limitation or function. Two operating modes are applicable for distributed control;the compensation voltage is allocated equally or according to capacity limitation. The operating mode of equally allocated compensation voltage for distributed control is analyzed as an example,which shows that,the working characteristics of two DVRs operating in this mode are similar to those of single DVR operating independently. Simulative results prove the proposed five operating modes have good feasibility.

Key words: dual-DVR structure; series; voltage sag; voltage harmonics; centralized control; distributed control; operating mode; compensation; topology

(上接第 73 页 continued from page 73)

Application of local mean decomposition in power quality disturbance detection

HUANG Chuanjin¹,CAO Wensi²,CHEN Tiejun³,QIU Daoyin²

(1. School of Engineering Technology,Zhongzhou University,Zhengzhou 450044,China;

2. School of Electric Power,North China University of Water Resources and Electric Power,Zhengzhou 450045,China;

3. School of Electrical Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China)

Abstract: LMD(Local Mean Decomposition) is applied in the detection of power quality disturbance. The typical interharmonic interference signal,short-time harmonic signal,transient harmonic signal,time-varying harmonic signal,as well as the actual multi-frequency harmonic signals occurred in transformers,are selected and analyzed by LMD. Results of interharmonic signal simulation show that,the LMD method is better than the HHT method in the parameter fluctuation of transient characteristic parameter detection,the end effect,the detection accuracy and the running time. Results of harmonic distortion signal simulation show that,the frequency,amplitude,occurrence and recovery time of disturbance signal can be accurately detected by LMD. The sag and distortion of 35 kV-side phase-B voltage caused by the switch-in of a 35 kV-side capacitor in a 500 kV substation are analyzed,proving the correctness of the proposed method.

Key words: local mean decomposition; harmonic analysis; interharmonic; harmonic distortion; power quality; electric power systems