

中频动态电压恢复器研究

刘海春,徐立智,谢少军

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

摘要: 针对机场直线加电系统电压稳定性较差的特点,提出采用动态电压恢复器(DVR)以稳定负载电压。首先对中频 DVR 应用在机场直线加电系统中的技术可行性进行了分析论证,提出了一种单向补偿的 DVR 设计方案,简化了系统的控制。其次对 DVR 的电路拓扑进行了分析比较,选取独立的单相全桥电路作为 DVR 的功率电路。建立了 DVR 的电路模型,对系统的电压控制策略进行了分析比较,选择负载电压有效值闭环控制作为中频 DVR 的控制方案。设计并制作了中频 DVR 样机,实验结果表明在电源电压跌落以及负载突变时 DVR 均可以稳定负载端电压。

关键词: 直线加电系统; 飞机电源; 中频; 动态电压恢复器; 电压控制策略; 电压跌落

中图分类号: TM 714.2; TM 761+1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0053-05

0 引言

机场对飞机进行地面维护时,需要提供 115 V、400 Hz 的中频交流电,对此目前广泛采用直线加电方式^[1],即由一个工频变换到高频的静止电源变换器产生中频电源,再经电缆将该电源送至飞机。由于电源频率较高,此时电缆上的压降也较明显。此外,机场地面环境复杂,电缆长度也因飞机位置的不同而变化很大,因此接入到飞机上的电压往往难以达到预定要求^[2-3]。本文提出一种新的解决方案,通过在负载侧串联一台动态电压恢复器(DVR)^[4-6],动态补偿电缆的压降,从而实现负载端电压的自动稳定。

首先,对中频 DVR 应用在机场直线加电系统中的技术可行性进行了分析论证,提出了一种单向补偿的 DVR 设计方案,从而避免了能量在 DVR 和电源之间的双向流动,简化了系统的控制。其次对三相四线制电路的 DVR 电路拓扑进行了分析比较,选取 3 个独立的单相全桥电路作为 DVR 的功率电路。建立了 DVR 的电路模型,对系统的电压控制策略进行了研究分析,选择负载电压有效值闭环控制作为中频 DVR 的控制方案。设计并搭建了中频 DVR 实验平台,并对本文所提的设计方案进行了实验验证。

1 系统设计方案

1.1 DVR 应用于机场直线加电系统的技术可行性

表 1 列出了机场直线加电系统参数的技术指标。根据表 1,可推算出 DVR 需要补偿的功率 S_D 为 4.5 kV·A,补偿器的容量较小,易于工程实现和小型化。其次考虑负载对电压波动的敏感性,根据表 1,在电网电压低于额定值时,要求 DVR 在 0.2 s,即 80 个电网周期内将负载电压补偿到额定值,相对于 DVR

表 1 机场直线加电系统的技术指标

Tab.1 Technical indexes of airport beeline power system

参数名称	数值
输入电压	115×(1±15%)V(单相)
瞬态频率偏差	±5%
输出电压	115±1V(单相)
电压恢复时间	0.2s
输出电频率	400×(1±0.5%)Hz
波形质量	THD≤5%,SHD≤4%
输出功率(三相)	30kV·A(额定)

的电压补偿特性,该电压恢复时间的要求是很容易满足的。对于输出电压的波形质量,采用数字控制的 DVR 逆变器完全可以满足相关技术要求。

综上,在机场直线加电系统中,应用 DVR 可以解决电源电压稳定性较差的问题。

1.2 系统框图

考虑到 DVR 需要对电源电压进行连续的补偿,因此其直流侧采用并联整流电路直接从电网获取能量。根据表 1,电源电压有效值为 115×(1±15%)V,如果采用 DVR 直接对其进行补偿,则要求 DVR 与电源之间能进行能量的双向交换。在这种情况下,要实现能量在 DVR 和电源之间的双向交换,则要求整流电路采用可控型开关元件^[7],这势必会增加系统的复杂程度。此外,中频电网容量较小,负荷变化大,一般不允许负载向电网馈送能量。针对于此,本文提出一种对电源电压进行预先降压的设计方法,即在电源输入端增加一个自耦降压变压器,其变比为 115:100,则副边输出电压有效值为 100×(1±15%)V,即电压最大值不超过 115 V,在这种情况下,DVR 将一直处于对电源电压不足部分的单向补偿状态,避免能量由串联变压器经逆变器流向电容,以致引起电容电压的泵升,这也使得 DVR 的整流器只需采用不控整流电路即可,从而大幅度简化了系统的控制。

当然,这种方案也会使 DVR 的设计容量增大一倍,但由于系统总体容量较小,这种容量的变化对 DVR 的工程实现影响不大。

综上,可得到中频 DVR 的系统框图,如图 1 所示。

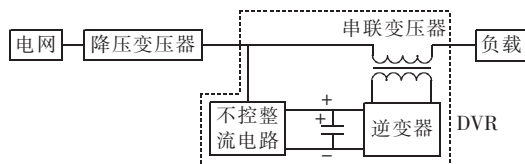


图 1 DVR 系统框图

Fig.1 Block diagram of DVR

2 DVR 逆变器电路拓扑

对于三相四线制电路,DVR 逆变器电路拓扑主要有分裂电容形成中点电路、三相四桥臂及 3 个独

立的单相全桥电路^[8-9]等。分裂电容形成中点电路结构简单,功率开关数量少,但直流侧电压利用率低,且只能输出两电平电压,输出电压波形质量较差。三相四桥臂电路利用第 4 桥臂以形成中点,可以输出三电平电压,但第 4 桥臂的增加也明显增加了系统控制的复杂程度。独立单相全桥拓扑功率开关数量较多,但每相的控制都是独立的,而且也相对简单。该拓扑也可以实现三电平电压的输出。

由于中频电网电压频率较高,开关管死区时间对 DVR 输出电压的波形影响较大,在这种情况下,不宜采用输出电压波形质量较差的分裂电容形成中点电路。考虑到中频 DVR 应用场合的特殊性,系统对 DVR 工作的稳定性提出了很高的要求,因此本文采用 3 个独立的单相全桥电路,如图 2 所示。

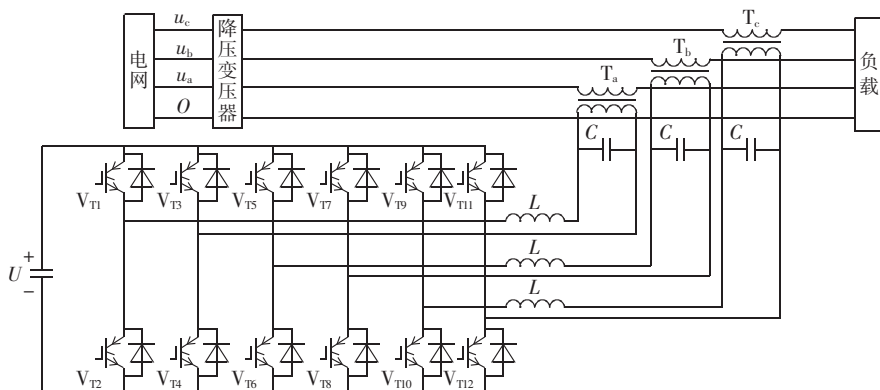


图 2 中频 DVR 逆变器拓扑

Fig.2 Inverter topology of mid-frequency DVR

3 中频 DVR 的控制策略

DVR 典型的控制策略有电源电压前馈、负载电压闭环及负载电压有效值闭环控制^[10-12]等,为分析这些控制策略的控制性能,首先建立单相中频 DVR 的电路模型,如图 3 所示。

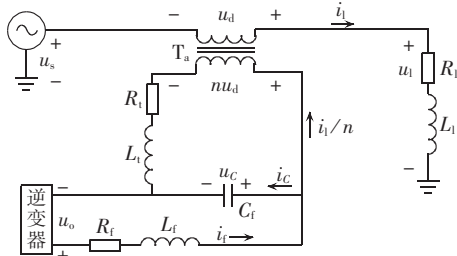


图 3 单相 DVR 的电路模型

Fig.3 Circuit model of single-phase DVR

图 3 中 R_f 为 LC 滤波网络上的等效电阻, R_L 和 L_L 分别为串联变压器 T_a 的等效电阻及漏感, R_L 和 L_L 为负载的阻抗, n 为串联变压器的变比。

根据系统设计要求,对图 3 中各主要参数的数值进行了分析设计,其数值的选取如表 2 所示。

3.1 电源电压前馈控制

根据图 3,可画出前馈控制的原理框图,如图 4 所示。

表 2 中频 DVR 电路参数

Tab.2 Circuit parameters of mid-frequency DVR

参数名称	数值
滤波电感 L_f	0.125 mH
滤波电容 C_f	30 μ F
滤波器等效电阻 R_f	0.5 Ω
串联变压器漏感 L_L	0.05 mH
串联变压器等效电阻 R_L	0.5 Ω
串联变压器变比 n	4
负载阻性成分 R_L	1 Ω
负载感性成分 L_L	0.3 mH

图 4 中 k_m 表示逆变器的等效增益,一般取 $k_m=n$ 。从图 4 可以得到 $U_1(s)$ 的表达式:

$$U_1(s) = G_{o1} U_1^*(s) + G_{o2} U_s(s) \quad (1)$$

其中, G_{o1} 、 G_{o2} 分别为 $U_1^*(s)$ 及 $U_s(s)$ 到 $U_1(s)$ 的传递函数,其表达式分别为

$$G_{o1} = \frac{nk_i(R_L + sL_L)}{a_0s^3 + b_0s^2 + c_0s + d_0} \quad (2)$$

$$G_{o2} = \frac{a_1s^3 + b_1s^2 + c_1s + d_1}{a_0s^3 + b_0s^2 + c_0s + d_0} \quad (3)$$

$$a_0 = L_f C_f (n^2 L_L + L_f)$$

$$b_0 = C_f [n^2 (R_f L_L + R_L L_f) + (R_f L_f + R_L L_f)]$$

$$c_0 = n^2 (L_L + R_f R_L C_f) + L_f + L_L + R_f R_L C_f$$

$$d_0 = n^2 R_L + R_f + R_L$$

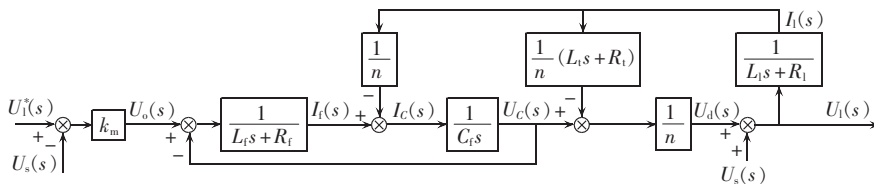


图 4 DVR 开环前馈控制框图

Fig.4 Block diagram of DVR open-loop feed-forward control

$$a_1 = L_f C_f n^2 L_1$$

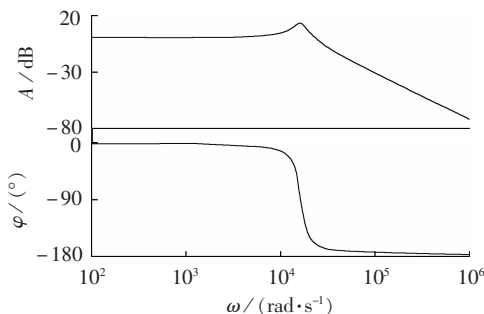
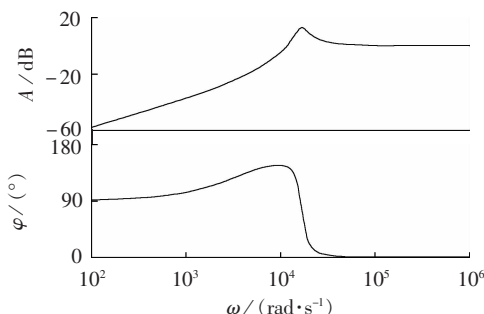
$$b_1 = C_f n^2 (R_f L_1 + R_1 L_f)$$

$$c_1 = n^2 R_f R_1 C_f + n(n - k_m) L_1$$

$$d_1 = n(n - k_m) R_1$$

根据劳斯判据,可以证明该系统始终是稳定的。将表 2 中的数据代入 G_{o1} 、 G_{o2} ,可绘出其相应的频率响应曲线,如图 5 所示。

由图 5(a)可知,负载电压与参考量存在一定的幅值及相位偏差,这主要是因为前馈控制并没有考虑串联变压器及 LC 滤波器阻抗对输出电压的影响。而在图 5(b)中,虽然在低频段(400 Hz 附近)负载电压对电源电压的扰动具有明显的抑制作用,但随着频率的升高,这种抑制作用也逐渐减弱。因此,前馈控制尽管在低频段可以较好地抑制电源电压的扰动,但对负载电压的控制效果并不理想。

(a) G_{o1} 频率响应曲线(b) G_{o2} 频率响应曲线图 5 G_{o1} 、 G_{o2} 的频率响应曲线Fig.5 Frequency response curves of G_{o1} and G_{o2}

3.2 负载电压反馈控制

根据图 3,绘出负载电压反馈控制的原理框图,如图 6 所示。

由图 6 推导出

$$U_1(s) = G_{c1} U_1^*(s) + G_{c2} U_s(s) \quad (4)$$

其中, G_{c1} 、 G_{c2} 分别为 $U_1^*(s)$ 以及 $U_s(s)$ 到 $U_1(s)$ 的传递函数,其表达式分别为

$$G_{c1} = \frac{nk_m(k_p s + k_i)(L_1 s + R_1)}{m_4 s^4 + m_3 s^3 + m_2 s^2 + m_1 s + m_0} \quad (5)$$

$$G_{c2} = \frac{n^2(L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1)(L_1 s + R_1)s}{m_4 s^4 + m_3 s^3 + m_2 s^2 + m_1 s + m_0} \quad (6)$$

$$m_4 = L_f C_f (n^2 L_1 + L_1)$$

$$m_3 = C_f [n^2(R_f L_1 + R_1 L_f) + (R_f L_1 + R_1 L_f)]$$

$$m_2 = n^2(L_1 + R_f C_f R_1) + L_1 + L_f + R_f C_f R_1 + nk_m k_p L_1$$

$$m_1 = n^2 R_1 + R_1 + R_f + nk_m(k_p R_1 + k_i L_1)$$

$$m_0 = nk_m k_i R_1$$

仍然采用表 1 中的参数,经过计算,系统稳定的条件是:

$$87 + 5k_p - 1.1 \times 10^{-3} k_i > 0 \quad (7)$$

不难看出,对于一般的 PI 参数,式(7)很容易满足。令 $k_p = 5$, $k_i = 0.1$,将表 1 中的数据代入式(5)(6),并据此绘出 G_{c1} 、 G_{c2} 的频率响应曲线,如图 7 所示。

由图 7(a)可知,在 400 Hz 附近负载电压与参考量存在一定的幅值偏差,这主要是因为电源电压只是作为一个扰动量,且其作用点位于输出端的末端比较点,要克服电源电压的扰动,必须由前向通道提供快速且较大的补偿量,对于一般的控制系统,这一点很难做到。通过增大 PI 环的比例参数可以改善补偿效果,但也会带来超调及动态响应时间变长等问题。在图 7(b)中,虽然在较大的频率区间内负载电压对电源电压的扰动具有稳定的抑制作用,但这种抑制作用并不十分明显。因此,负载电压单闭环控制策略也难以获得理想的控制效果。

3.3 负载电压有效值闭环控制

负载电压有效值闭环控制示意图如图 8 所示。

图 8 中, U_1^* 为负载电压有效值参考量, U_1 为负载电压有效值采样量, u_1 到 U_1 之间为一延时环节,因

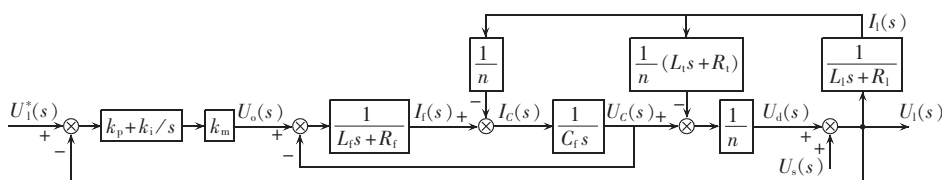


图 6 电压单闭环控制策略控制框图

Fig.6 Block diagram of load voltage close-loop control

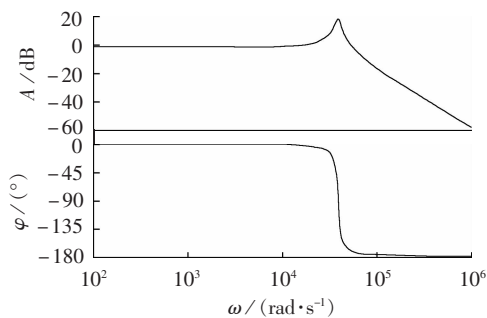
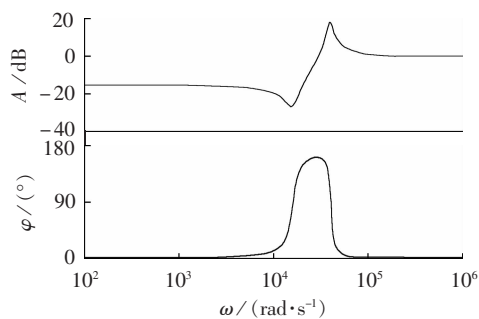
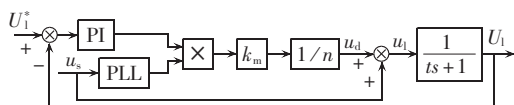
(a) G_{c1} 频率响应曲线(b) G_{c2} 频率响应曲线图 7 G_{c1} 、 G_{c2} 的频率响应曲线Fig.7 Frequency response curves of G_{c1} and G_{c2} 

图 8 负载电压有效值闭环控制示意图

Fig.8 Schematic diagram of load voltage RMS close-loop control

为由电压瞬时值计算得到有效值一般都需要一定的时间, t 表示计算延时时间。由图 8 可进一步得到负载电压有效值闭环控制示意图, 如图 9 所示。

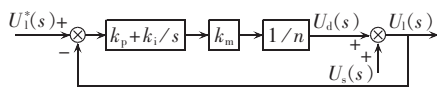


图 9 负载电压有效值闭环控制图

Fig.9 Block diagram of load voltage RMS close-loop control

由图 9 分别写出输出对输入以及扰动信号的传递函数:

$$\frac{U_1(s)}{U_1^*(s)} = \frac{k_m(k_p s + k_i)}{(n + k_p k_m)s + k_m k_i} \quad (8)$$

$$\frac{U_1(s)}{U_s(s)} = \frac{n s}{(n + k_p k_m)s + k_m k_i} \quad (9)$$

系统传递函数的极点为

$$s = -\frac{k_m k_i}{n + k_p k_m} < 0 \quad (10)$$

该极点位于虚轴的右半面, 由控制理论可知该系统具有内在的稳定性, 但因为其极点没有虚部, 因此动态特性较差。随着 k_p 的增大, 极点向虚轴靠近, 系统稳定性变差, 动态响应变快; 而随着 k_i 的增大, 极点远离虚轴, 系统稳定性增强。由于电压有效值基本可以认为是一直流量, 因此式(8)(9)中的 s 可

视为零, 则

$$U_1(s)/U_1^*(s) \approx k_m k_i / (k_m k_i) = 1 \quad (11)$$

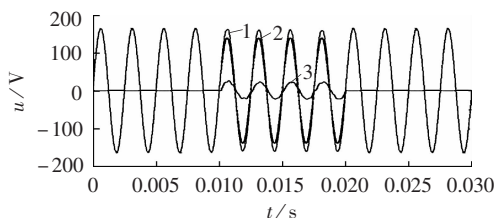
$$U_1(s)/U_s(s) \approx 0 \quad (12)$$

由式(11)可知 U_1 可较好地跟踪 U_1^* , 同时也能很好地抑制 U_s 的变化。

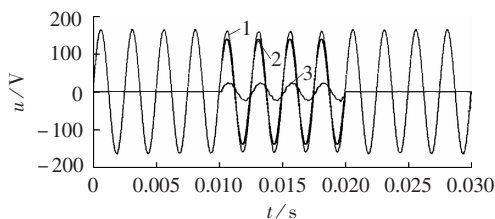
综上, 通过选择适当的 PI 参数, 负载电压有效值闭环控制策略可以满足电压暂降补偿要求。

3.4 仿真研究

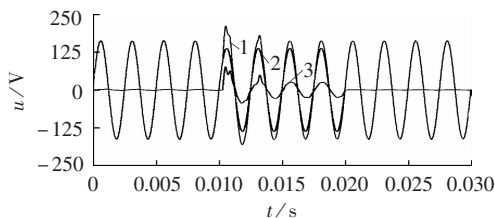
为比较以上几种方法的控制性能, 采用同相补偿策略^[13], 在 Matlab 软件里搭建了中频 DVR 模型并进行了仿真, 仿真参数: 电源电压频率为 400 Hz, 有效值为 115 V, 在 0.01~0.02 s 时段跌落 15%, 在此时段投入 DVR 进行补偿; 系统中元件参数采用表 2 数据, 仿真结果如图 10 所示。



(a) 前馈控制波形



(b) 负载电压闭环控制波形



(c) 负载电压有效值闭环控制波形

图 10 DVR 仿真波形

Fig.10 Simulative waveforms of DVR

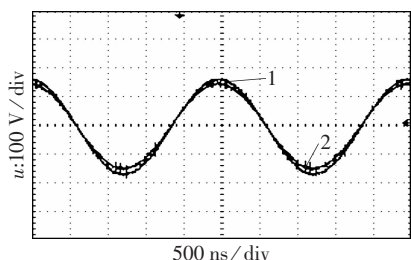
图 10 中 1 表示负载电压, 2 为电源电压, 3 为 DVR 输出的补偿电压。在图 10(a)中, 当电源电压跌落时 DVR 可以瞬间输出补偿电压, 动态响应速度非常快, 但补偿后的负载电压并没有达到设定的参考值, 说明系统存在一定的静差。类似的情形也出现在图 10(b)中, 说明负载电压闭环控制效果也不理想。而在图 10(c)中, 当电源电压跌落时由于对负载电压有效值的计算存在延时, DVR 的输出出现了一定的超调, 但之后负载电压恢复到了跌落前的水平, DVR 显示了良好的补偿特性。

综上, 尽管负载电压有效值闭环控制策略的动态特性较差(存在约 1 个周期的响应时间), 但该方法可以无静差地补偿电源电压的跌落部分, 因此本系统选取该方法作为 DVR 的控制策略。

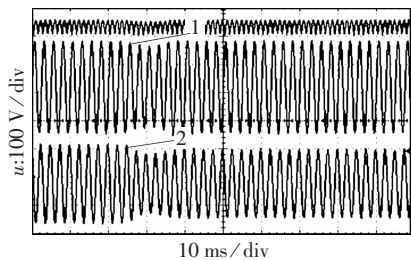
4 实验验证

利用 TI 公司的 TMS2407A 芯片,设计并完成了中频 DVR 样机的制作。采用负载电压有效值闭环控制方案,对中频 DVR 进行了实验调试。实验参数:电源电压有效值正常为 115 V,跌落深度约 10%,负载为 $1.4\ \Omega$ 的阻性负载,其他元件参数如表 2 所示。实验结果如图 11 所示。图 12 是在负载突变情形下 DVR 的工作波形。

图 11 中信号 1 为负载电压,2 为电源电压。图 11(a)为 DVR 的静态补偿波形,经过 DVR 补偿后,负载电压达到了飞机地面供电标准要求。图 11(b)是 DVR 的动态补偿波形,可见,在电源电压发生跌落时,在 DVR 的补偿作用下,负载电压经过约 3~4 个



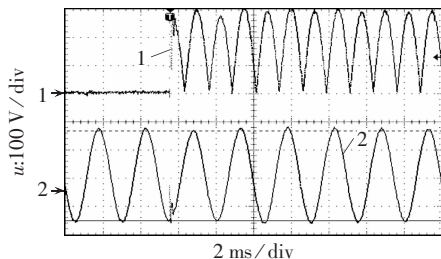
(a) 中频 DVR 的静态补偿实验波形



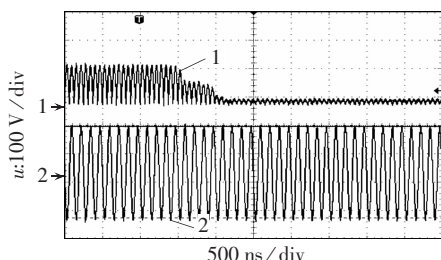
(b) 中频 DVR 的动态补偿实验波形

图 11 中频 DVR 的补偿实验波形

Fig.11 Experimental waveforms of mid-frequency DVR compensation



(a) 突加负载



(b) 突卸负载

图 12 负载突变实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of

基波周期后恢复到了原来的大小,说明 DVR 的电压补偿特性完全符合机场直线加电系统的技术要求。

图 12 中信号 1 为负载电流信号输入至一整流桥的检测波形,2 为负载电压。由图可见,在负载突变时,负载电压基本保持了稳定,系统具有良好的负载适应性。

5 结论

a. 采用中频 DVR 可以解决机场直线加电系统中电压稳定性较差的问题。

b. 采用预先降压的方法可以使 DVR 工作于单向补偿的状态,从而可以降低系统控制的复杂程度,符合中频供电网络的要求。

c. 对系统的建模分析及仿真研究表明:电源电压前馈及负载电压反馈控制在中频 DVR 系统中无法获得理想的补偿效果,负载电压有效值控制虽然动态特性相对较差,但可以实现无静差补偿,可以应用于中频 DVR 系统。

d. 实验结果验证了中频 DVR 系统方案的正确性。基于本文工作研制的某型中频供电补偿装置已得到工程应用。

参考文献:

- [1] 曾建良. 军用机场直线加电设计[J]. 机场工程,2000,9(3):22-27.
ZENG Jianliang. Design of beeline power supply system of military airport[J]. Airport Engineering,2000,9(3):22-27.
- [2] NIELSEN J G,NEWMAN M,NIELSEN H,et al. Control and testing of a Dynamic Voltage Restorer(DVR) at medium voltage level[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2004,19(3):806-813.
- [3] RAMASAMY A K,KRISHNAN I R,RAMACHANDARAMUTHY V K,et al. Dynamic voltage restorer for voltage sag compensation[C]//International Conference on Power Electronics and Drives Systems. Tokyo,Japan:[s.n.],2005:1289-1294.
- [4] 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):16-21.
ZHANG Xiujian,YANG Chao,TANG Zhi,et al. The voltage injection analysis in series power quality controller[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):16-21.
- [5] 林智声,戴宁怡,黄民聪,等. DVR 的不平衡浪涌和过电压控制[J]. 电力系统自动化,2005,29(20):35-39.
LIN Zhisheng,DAI Ningyi,HUANG Mincong,et al. Unbalanced voltage swell and over-voltage control in dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(20):35-39.
- [6] 唐志,杨潮,马维新. 串联型电能质量补偿器主电路设计方案[J]. 电力系统自动化,2002,26(19):32-35.
TANG Zhi,YANG Chao,MA Weixin. Analysis and design of the main circuit of series power quality compensator[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(19):32-35.
- [7] WOODLEY N H,MORGAN L,SUNDARAM A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1999,14(3):1181-1186.
- [8] CHOI S S,LI J D,VILATHGAMUWA D M. A generalized voltage compensation strategy for mitigation the impact of voltage sags/swells[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2005,20(2):2289-2297.

(下转第 63 页 continued on page 63)

(上接第 57 页 continued from page 57)

[9] KIM H,SUL S K. Compensation voltage control in dynamic voltage restorers by use of feed forward and state feedback scheme[J]. IEEE Trans on Power Electronics ,2005 ,20(5) : 1169-1177.

[10] 黄翰,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 Yingduo,et al. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network [J]. Power System Technology,2002,26(1):1-4.

[11] 周晖,齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术,2006,30(6):23-29.
ZHOU Hui,QI Zhiping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System

Technology,2006,30(6):23-29.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

刘海春(1977-),男,江西鹰潭人,讲师,博士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:nuaalhc@nuaa.edu.cn);

徐立智(1984-),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术;

谢少军(1968-),男,湖北天门人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子技术。

Mid-frequency dynamic voltage restorer

LIU Haichun,XU Lizhi,XIE Shaojun

(College of Automation Engineering,Nanjing University of Aeronautics
& Astronautics,Nanjing 210016,China)

Abstract: Aiming at the voltage instability of airport beeline power system,the DVR(Dynamic Voltage Restorer) is proposed to stabilize the load voltage. Its feasibility is analyzed and a unilateral compensation scheme is designed to simplify the control of DVR. Based on the comparison of DVR circuit topology,the single-phase full-bridge circuit is selected as its power circuit and the DVR model is established. Based on the analysis of its voltage control strategies,the close-loop control of load voltage RMS is selected for mid-frequency DVR. A mid-frequency DVR prototype is designed and implemented,and the experimental results show that the load voltage is stable during source voltage sag or sudden load change.

Key words: beeline power system; airplane power supply; mid-frequency; DVR; voltage control strategy; voltage sag