

文章编号:1671-251X(2016)06-0070-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.06.017

王玲,吴涛,李志忠.井下UPS并联供电系统无差拍环流抑制方法[J].工矿自动化,2016,42(6):70-74.

井下 UPS 并联供电系统无差拍环流抑制方法

王玲¹, 吴涛¹, 李志忠²

- (1. 国网陕西省电力公司 培训中心, 陕西 西安 710054;
2. 国家电网公司 电网接地工程技术实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:为了提升煤矿井下UPS供电系统的可靠性,提出了井下UPS并联供电系统无差拍环流抑制方法。首先,建立了UPS并联供电系统拓扑结构的等效离散数学模型,并重点分析了UPS并联供电系统中存在的零序环流问题;然后,引入非线性无差拍控制器对零序电流进行平抑处理;最后,通过 2×35 kW UPS并联供电系统实验样机对该方法进行验证与分析。实验结果表明,该方法可有效抑制井下UPS并联供电系统的零序环流,且仅需 $2 \sim 5$ ms即可实现UPS并联供电系统的冗余性恢复。

关键词:矿井UPS并联供电;不间断电源;环流抑制;无差拍控制

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2016-06-01 10:32

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20160601.1032.016.html>

Dead-beat circulating current suppression method of underground UPS paralleling power supply system

WANG Ling¹, WU Tao¹, LI Zhizhong²

(1. Training Center, State Grid Shannxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China;

2. Power Grounding Engineering Laboratory, State Grid Corporation, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to improve reliability of underground UPS power supply system, a dead-beat circulating current suppression method of underground UPS paralleling power supply system was put forward. Firstly, an equivalent discrete mathematical model of UPS paralleling power supply system topology was established, and zero sequence circulating current in paralleling power supply system was emphatically analyzed. Then, nonlinear dead-beat controller was introduced to control and process zero sequence current. Finally, verification and analysis of the method were done by prototype of 2×35 kW UPS paralleling power supply system. The experimental results show that the method can effectively inhibit zero sequence current of underground UPS paralleling power supply system, and realize redundancy restoration of UPS paralleling power system in $2 \sim 5$ ms.

Key words: mine UPS paralleling power supply; UPS; circulating current suppression; dead-beat control

0 引言

煤矿井下UPS供电系统是煤矿发生安全事故后确保相关安全监控和生命保障装置运行的重要设备,是遇险的井下工作人员的重要生存依仗。UPS

供电系统的自身可靠性、可恢复性对整个备用供电系统尤为重要^[1-4]。目前,UPS供电系统多采取 N 组逆变单元并联式结构,具有冗余性、可扩展性、高可靠性及易维护等优点^[5-6]。然而,各UPS逆变单元因其工作状态不同步或系统单元参数不同,

收稿日期:2016-01-12;修回日期:2016-04-22;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(E070303)。

作者简介:王玲(1983—),女,山西大同人,讲师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护及自控技术,E-mail:sxdw_wl@126.com。

UPS并联供电系统在低频段存在极低阻抗的环流通路,将造成系统出现不均流现象,甚至造成UPS逆变单元中功率器件过流损坏^[7-10]。

针对煤矿井下恶劣环境对UPS并联供电系统可靠性、自恢复性提出的特殊要求,本文提出了一种井下UPS并联供电系统无差拍环流抑制方法。首先,建立UPS并联供电系统拓扑结构的等效离散数学模型,并对UPS并联供电系统中存在的高频、零序环流问题进行重点分析;为满足井下UPS并联供电系统单元故障下的快速自恢复特性,引入非线性无差拍控制器对零序电流进行前馈补偿;最后,基于 $2 \times 35 \text{ kW}$ UPS并联供电系统实验样机对该方法进行验证与分析。实验结果表明,该方法可充分发挥井下UPS并联供电系统的冗余特性,仅需 $2 \sim 5 \text{ ms}$ 即可实现井下UPS并联供电系统的在线自恢复。

1 UPS并联供电系统建模

煤矿井下UPS并联供电系统多采用“一用一备”的双机组并联式结构,双模块UPS并联供电系统结构如图1所示。

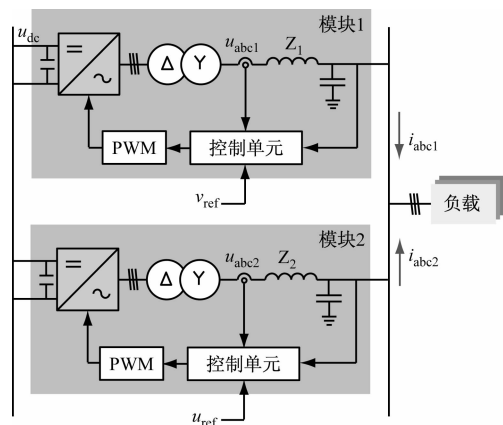


图1 双模块UPS并联供电系统结构

双模块UPS并联供电系统采用共直流母线供电方式,将每个逆变模块等效为一个电压源和内阻抗串联电路,假设各个并联模块的输出阻抗相同,则可建立UPS并联供电系统平均输出电压方程:

$$u_{\text{avg}} = \frac{u_{\text{abc1}} + u_{\text{abc2}}}{2} \quad (1)$$

式中: u_{avg} 为并联逆变模块的平均输出电压; u_{abc1} , u_{abc2} 为并联逆变模块的输出端口电压。

同时,可定义UPS并联供电系统等效环流表达式为

$$i_z = \frac{u_{\text{abc1}} - u_{\text{avg}}}{Z_1 + Z_2} = -\frac{u_{\text{abc2}} - u_{\text{avg}}}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

式中: i_z 为UPS逆变模块对应的零序环流; Z_1 、 Z_2

为并联逆变模块内阻抗。

为了简化三相UPS并联供电系统模型,将模型的坐标系由三相静止坐标系变换到两相同步旋转坐标系。由于UPS并联供电系统存在零序电压分量,同时零序电路的低阻抗特性将使UPS并联供电系统中出现零序环流,为此,在常规的二维坐标中须引入附加的 z 轴分量,即

$$X_{dqz} = \mathbf{T} X_{\text{abc}} \quad (3)$$

式中: X 为系统状态变量; $\mathbf{T}$ 为坐标变换矩阵。

根据式(1)~式(3),可重写共直流母线UPS并联供电系统在同步旋转 dqz 坐标系下的数学模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_1} \begin{bmatrix} d_{d1} \\ d_{q1} \end{bmatrix} u_{\text{dc}} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_2} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_2} \begin{bmatrix} d_{d2} \\ d_{q2} \end{bmatrix} u_{\text{dc}} \quad (5)$$

$$\frac{di_{z1}}{dt} = -\frac{di_{z2}}{dt} = \frac{\Delta d_z u_{\text{dc}}}{Z_1 + Z_2} \quad (6)$$

式中: i_{dqz1} , i_{dqz2} 分别为UPS模块1、模块2的 dqz 坐标分量; ω 为UPS模块输出电压角频率; e_{dq} 为负载反电动势 dq 轴分量; Δd_z 为UPS模块的零轴电压占空比; u_{dc} 为直流母线电压; d_{dq1} , d_{dq2} 分别为UPS模块1、模块2的 dp 轴占空比; L_1 , L_2 分别为UPS模块1、模块2的输出电感。

图2给出了UPS并联供电系统电流 dqz 轴分解示意,UPS模块内电流在 dqz 坐标系下已出现严重畸变,呈不规则曲线,但电流在 dq 坐标系下仍为标准电流圆,电流幅值 $|i_{dq}|$ 为额定负载 1 pu 。反观此时 dz 坐标系下的电流分量,其 z 轴电流分量幅值也同样达到 1 pu ,即UPS单模块电流幅值达到 1.414 pu ,将造成UPS保护单元误动作,甚至会造成主电路功率单元过流、过热损坏。

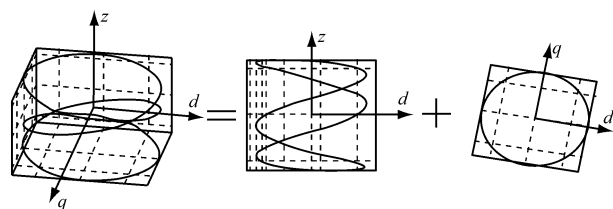


图2 UPS并联供电系统电流 dqz 轴分解示意

2 无差拍环流抑制方法

根据前文分析可知,对于煤矿井下双模块UPS并联供电系统,当其出现不一致的低频零序电压误

差时,由于此时环流路径为低阻抗回路,即使零序电压很小,也会在 UPS 并联供电系统双模块之间产生极大的环流。为此,引入非线性无差拍控制器对零序电流 i_z 分量进行平抑处理。

根据式(6)可知,产生 UPS 并联供电系统零序环流的关键在于其不一致的零序分量。为此,需从 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation, 空间矢量脉宽调制)七段式导通机理出发进行分析,如图 3 所示。对于采用 SVPWM 方式的控制系统,其 3 个上桥臂导通的时间分别为 $d_a T_s$ 、 $d_b T_s$ 、 $d_c T_s$ (T_s 为系统控制周期),为了保证 UPS 并联供电系统可靠运行,需要保持空间合成矢量占空比不变,因而 d_1 、 d_2 不能发生改变。但通过调节零矢量(000)和(111)的作用时间 d_0 ,能够改变 UPS 并联供电系统的零序分量,即

$$\begin{aligned} d_z &= d_a + d_b + d_c = \left(d_1 + d_2 + \frac{d_0}{2} - 2y\right) + \\ &\left(d_2 + \frac{d_0}{2} - 2y\right) + \left(\frac{d_0}{2} - 2y\right) = \\ &d_1 + 2d_2 + \frac{3}{2}d_0 - 6y \end{aligned} \quad (7)$$

式中: d_z 为零序电压占空比; d_a 、 d_b 、 d_c 为 abc 三相电压占空比; d_1 、 d_2 、 d_0 分别为 SVPWM 主、次、零矢量占空比; y 为七段式调制零矢量修正量。

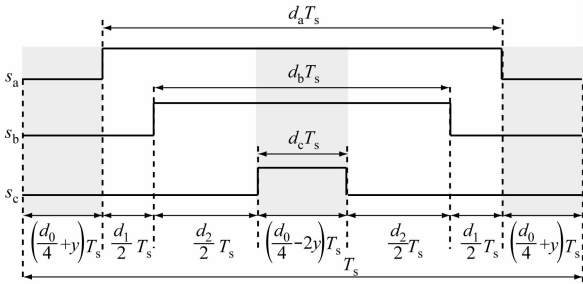


图 3 SVPWM 调制方式下的七段式导通时间

因此,可求得 UPS 并联供电系统零序电压误差值为

$$\begin{aligned} \Delta d_z &= d_{z_1} - d_{z_2} = \left(d_{11} + 2d_{21} + \frac{3}{2}d_{01} - 6y\right) - \\ &\left(d_{12} + 2d_{22} + \frac{3}{2}d_{02}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: d_{z_1} 、 d_{z_2} 分别为 UPS 模块 1 和模块 2 的零序电压占空比; d_{11} 、 d_{21} 分别为 UPS 模块 1 和模块 2 的主电压占空比; d_{12} 、 d_{22} 分别为 UPS 模块 1 和模块 2 的次电压占空比; d_{01} 、 d_{02} 分别为 UPS 模块 1 和模块 2 的零序电压占空比。

在此基础上,可直接建立同步旋转 dqz 坐标系下的零序电流 i_z 的微分方程:

$$\frac{di_{z_1}}{dt} = -\frac{di_{z_2}}{dt} = \frac{0.5(\Delta d_{12} + 12y)u_{dc}}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

考虑到实际 UPS 并联供电系统逆变单元的开关特性,根据等效前项差分原理对式(9)进行离散化建模,得

$$\frac{i_{z_1}(k+1) - i_{z_1}(k)}{T_s} = \frac{0.5(\Delta d_{12}(k) + 12y_1(k))u_{dc}(k)}{Z_1 + Z_2} \quad (10)$$

式中 $i_{z_1}(k)$ 、 $i_{z_1}(k+1)$ 分别为第 k 、第 $k+1$ 时刻的 UPS 并联供电系统零序电流分量。

至此,可求得 k 时刻精确抑制 UPS 并联供电系统零序环流的零电压矢量修正量为

$$y(k) = \frac{2L[i_{z_1_ref}(k) - i_{z_1}(k)]/T_s u_{dc}(k) - \frac{1}{2}\Delta d_{12}(k)}{6} \quad (11)$$

式中 $i_{z_1_ref}(k)$ 为零序电流分量期望值。

3 实验验证

基于无差拍控制的井下 UPS 并联供电系统整体控制结构如图 4 所示,系统包括 UPS 控制电路、UPS 逆变电路和负载电路 3 个部分。UPS 并联供电系统采用共用电压外环,并以 CAN 总线形式向各 UPS 模块分配有功、无功电流的期望值 i_{dq}^* 。各 UPS 模块具备独立的电流内环,即 PWM 调制模块,此外,本文引入的无差拍控制器可有效抑制 UPS 并联供电系统的零序环流,保证各 UPS 模块有效均流。

为了验证所提无差拍控制环流抑制方法的可行性和有效性,搭建了 2×35 kW UPS 并联供电系统实验样机。

井下 UPS 并联供电系统稳态性能测试结果如图 5 所示。图 5(a)中, u_{inv} 为 UPS 模块输出电压, u_{out} 为 LC 正弦滤波器后端输出电压。由图 5(a)可知,LC 滤波单元有效消除了 UPS 逆变单元中的高频谐波分量,UPS 模块输出电压满足幅值稳定、正弦度高的电能指标。图 5(b)中, i_a 为 UPS 模块 A 相输出电流, i_z 为双 UPS 模块之间的零序环流。UPS 模块工作在满载状态,电流幅值达到 54 A,零序环流 i_z 的最大幅值仅为 5 A,占 UPS 模块额定值的 9.26%,双 UPS 机组均流特性良好。图 5(c)为 UPS 模块输出电压 u_{out} 频谱分析结果,其中电压总畸变率为 4.2%,且 3、5、7 次低频谐波分量低,满足 IEEE-754 对 UPS 电源提出的指标要求。

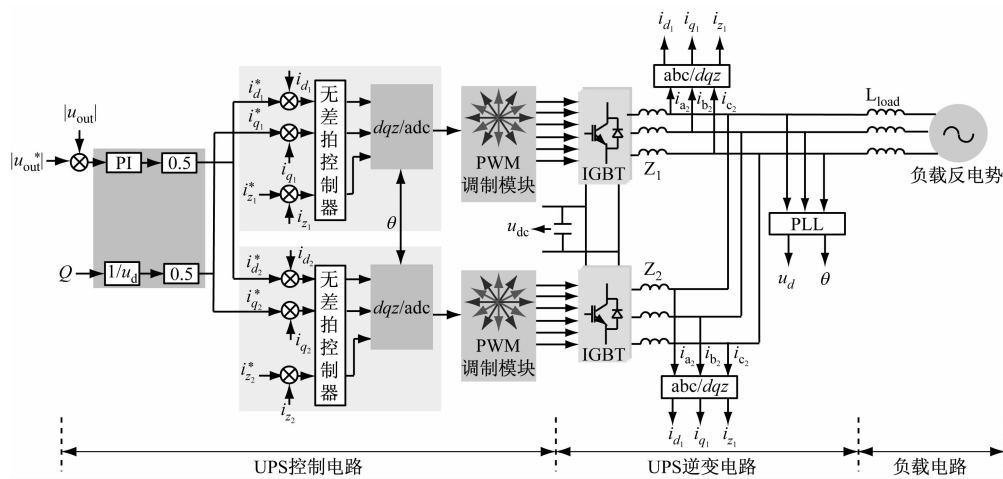
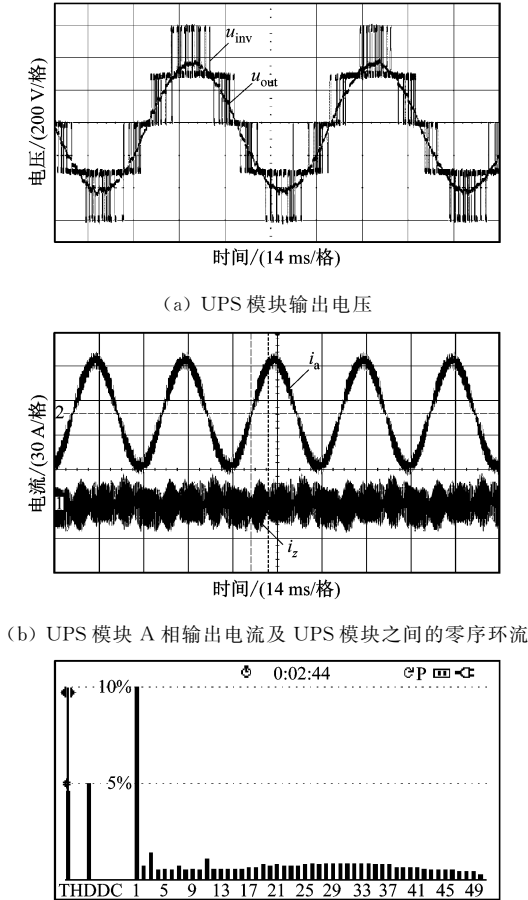


图 4 基于无差拍控制的井下 UPS 并联供电系统整体控制结构

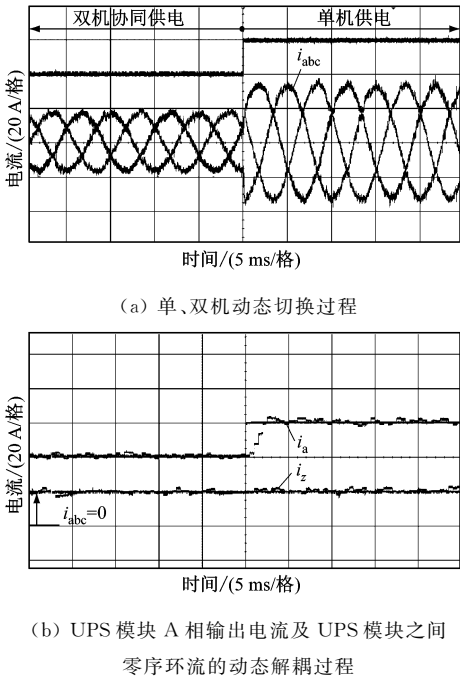


(c) UPS 模块输出电压频谱分析结果

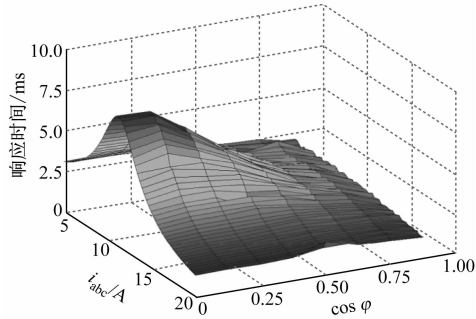
图 5 井下 UPS 并联供电系统稳态性能测试结果

井下 UPS 并联供电系统动态投切测试结果如图 6 所示。图 6(a)中,在 25 ms 时,UPS 并联供电系统由 1 号、2 号双机协同供电切换至 1 号单机供电方式,此时,1 号单机单独向负载通风机供电,起到冗余备用保护功能,承担负载通风机全部电流,三相电流幅值 $|i_{abc}|$ 也在该时刻阶跃为 2 倍。图 6(b)给出了动态切换过程中 UPS 模块内部 A 相输出电

流 i_a 和 UPS 模块之间零序环流 i_z 的解耦过程,可以看出满载切换过程耗时仅为 3 ms,且零序环流 i_z 并未出现瞬时突增、突减问题,可见无差拍控制的井下 UPS 并联供电系统动态性能优异;图 6(c)为不



(b) UPS 模块 A 相输出电流及 UPS 模块之间零序环流的动态解耦过程



(c) UPS 并联供电系统自恢复时间统计结果

图 6 井下 UPS 并联供电系统动态投切测试结果

同负载、不同功率因数特性下 UPS 并联供电系统自恢复时间统计结果,当功率因数 $\cos \varphi=0.2$ 时,出现响应时间峰值,即便如此,该值也仅为 5 ms,满足矿山设备动态备用供电响应时间要求。

4 结语

为了满足煤矿井下恶劣环境对 UPS 供电系统可靠性、自恢复性的特殊要求,提出了一种井下 UPS 并联供电系统无差拍环流抑制方法,并基于 $2 \times 35 \text{ kW}$ UPS 并联供电系统实验样机对该方法进行了验证与分析。实验结果表明,该方法具备优异的零序环流抑制效果,且仅需 $2 \sim 5 \text{ ms}$ 即可实现井下 UPS 并联供电系统的在线自恢复。

参考文献:

[1] 孙继平. 煤矿监控新技术与新装备[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 1-5.

[2] 崔昊辰, 李岳, 沙成, 等. 矿用 UPS 中智能充电系统设计[J]. 煤炭工程, 2014, 46(2): 19-21.

[3] 李博. 煤矿井下备用电源网络化电池管理系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(6): 42-43.

[4] CAO L L, ZHAO G L, YU F F, et al. Research of mine flameproof UPS based on SCM[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(6): 231-233.

[5] YI W M, GAO F, SUN Q R, et al. Study on envelope analysis of workspace based on 6-UPS parallel mechanism [J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 703: 312-317.

[6] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. 基于下垂特性控制的无互连线并联 UPS 建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 33-38.

[7] 李飞胤, 祝龙记. 基于 DSP 控制的矿用 UPS 电源设计[J]. 煤矿机械, 2013, 34(5): 187-189.

[8] LAZZARIN T B, BARBI I. DSP-Based control for parallelism of three-phase voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 749-759.

[9] 何国锋, 徐德鸿. 基于解耦控制的多模块逆变器并联系统直流环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 43-51.

[10] 何国锋. 多逆变器并联系统若干关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.