

不平衡负载下三相 UPS 逆变器的研究

Research on Three-phase UPS with Unbalanced Load

叶彬城¹, 孟超^{1,2}, 魏闻²

1. 中航太克(厦门)电力技术股份有限公司(厦门, 361028);

2. 厦门大学能源学院(厦门, 361102)

Ye Bincheng¹, Meng Chao^{1,2}, Wei Wen¹

1.PROTEK Electronic Technology Corporation (Xiamen, 361028. China);

2.School of Energy, Xiamen University (Xiamen, 361002, China)

摘要: 三相电压的对称输出是衡量交流电源性能的一个重要指标。提出了一种新型的三相 UPS 逆变器系统, 利用 Δ/ZO 型变压器为三相不平衡负载造成的零序电流分量提供通路, 再通过设计正、负序双 PI 控制器抑制不平衡负载中负序电压分量。从而解决零序电压和负序电压造成的三相电压不平衡问题, 使该三相 UPS 逆变电源系统可带三相不平衡负载。试制一台 60kVA 的三相 UPS 样机, 并给出实验结果。

关键词: 三相 UPS 三相逆变器 不平衡负载 电压对称性

Abstract: The balanced output of three-phase voltage is an important index to measure the function of alternating current. In order to obtain high-grade output voltage in the case where the load is out-of-balance, this paper analyzed the mechanism and result of three-phase voltage caused by unbalanced load, and some existing solutions to solve this problem. A new three-phase UPS inverter system is also raised which use Δ/ZO transformer to provide a current path for zero-sequence current that caused by three-phase unbalanced load. What's more, it controlled the component of negative sequence voltage in the unbalanced load by designing the doubled PI controller (of positive and negative sequence). In these ways it could solve the imbalance of three-phase voltage caused by Zero-sequence voltage and, making the three-phase UPS inverter system able to load the three-phase unbalanced load. A 60kVA three-phase UPS prototypes was built and the results were given based on the experiments.

Key words: Three-phase UPS, Three-phase inverter, Unbalanced load, Voltage symmetry

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2016) 04-0021-04

1 引言

一般三相电压不对称的成因有两种: ①系统本身的参数不对称, 这样即使接入三相平衡负载, 其三相输出电压也会不对称; ②由三相负载的不平衡导致的三相输出电压不对称。由于三相 UPS 往往要接不平衡负载, 也就是经常处于不平衡负载情况下运行, 在实际工况下, 逆变器系统总是会有一定的输出阻抗, 因此会导致三相输出电压的不对称。所以, 三相负载的不平衡是导致 UPS 三相输出电压不对称的最常见原因。常见的矫正措施, 主要包括以下 4 种拓扑形式: 插入 Δ/Y 变压器拓扑式^[2]、三相分裂电容式逆变拓扑^[3]、三相四桥臂逆变拓扑式^{[4][5]}, 以及使用组合式三相逆变器等^[6]。

现有的文献对三相逆变器输出电压不平衡产生的机理和控制方法已经做出了很多研究^{[9][10][11]}。本文分析常见的几种不平衡电压校正方法, 并提出了一种新型的三相 UPS 逆变器系统, 该系统利用 Δ/ZO 型变压器为三相不平衡负载造成的零序电流分量提供通路, 再通过设计正、负序双 PI 控制器, 抑制不平衡负载中负序电压分量。从而解决零序电压和负序电压造成的三相电压不平衡问题, 使该三相 UPS 逆变电源系统可带三相不平衡负载。该文试制一台 200kVA 的三相 UPS 样机, 并给出实验结果。

2 现有 UPS 解决不平衡负载的常见方案

常见的 UPS 解决不平衡负载的方案, 主要包括以下几种

方式：插入 Δ/Y 变压器、使用分裂电容式的三相逆变器、使用三相四桥臂逆变器，以及使用组合式三相逆变器，以下分别加以说明。

2.1 使用 $\Delta/Y0$ 变压器

使用 $\Delta/Y0$ 变压器是最为简单的一种矫正方法，如图 1 所示。它是在传统的三相三桥臂逆变器和负载之间插入 $\Delta/Y0$ 变压器。变压器次级绕组的 $Y0$ 接法，可以保证给负载不平衡所产生的中性电流提供一个通路，而初级 Δ 形连接，给由负载不平衡或 3 的倍数次谐波零序电流提供环流回路。不仅能抑制三次谐波，还能让负载不平衡时所产生的零序电流在初级线圈内形成环流。其固有的优点为输出不含零序电压，并且在发生故障时，由于隔离变压器短路阻抗的存在，可以有效地减少对一次侧的冲击，起到缓冲作用。虽然三桥臂逆变器带 $\Delta/Y0$ 变压器可以有效减小输出不平衡度，但由于其零序电流在变压器初级绕组线圈内形成环流发热，影响变压器使用寿命，所以仍需要其他方法加以改进^[2]。

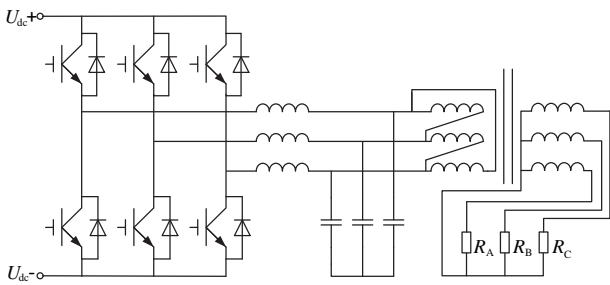


图 1 $\Delta/Y0$ 变压器三相逆变器拓扑结构

2.2 使用分裂电容式的三相逆变器

分裂电容式三相逆变拓扑如图 2 所示。是将三相负载的中性点连接到传统三相逆变器的直流侧电容中点，这时三相逆变器可以等效成三个独立的半桥逆变器，采用三相分别控制，来保证负载不平衡时仍能保持三相输出电压的对称。但是，采用两个电容串联，在单相负载时它们必须承受全负载相电流，从而所需电容容量较大，在实际应用中增大了成本；两个串联的电容还存在均压问题，而且直流电压利用率低，拓扑功率不容易做大^[3]。

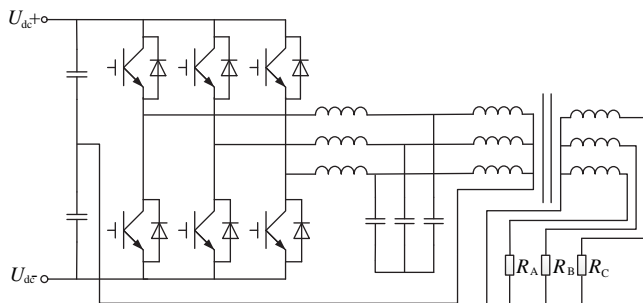


图 2 分裂电容式的三相逆变器拓扑结构

2.3 使用三相四桥臂逆变器

三相四桥臂逆变器如图 3 所示。在传统三桥臂结构基础上增加一个桥臂，以直接控制中性点电压，从而产生三相独立电压，使其有能力在不平衡负载下维持三相电压对称输出。该电路拓扑可以直接控制中性电流，实现较高的直流电压利用率，并且直流输入电容较小，无须大分压电容，可以省去中点，形成变压器或 Δ/Y 变压器，减小逆变器的体积和重量。但是，其开关频率低，限制了调节带宽，也不适用于输入输出隔离的逆变器场合^{[4][5]}。

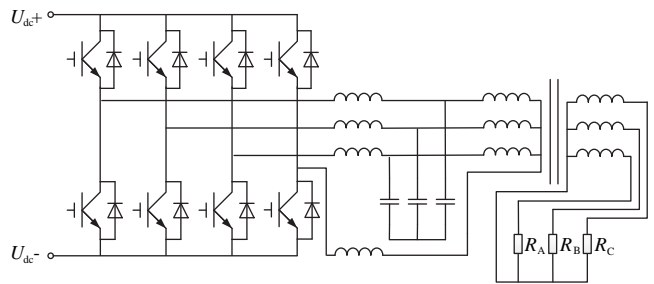


图 3 三相四桥臂逆变器的拓扑结构

2.4 使用组合式三相逆变器

组合式三相逆变器电路结构如图 4 所示。由三个单相逆变器组成，其输出通过三个单相变压器耦合成三相电路，采用三套独立的控制电路来确保三相输出电压平衡。此种结构，每相可分别独立控制、易实现模块化结构、在线热更换、 $N+1$ 模块冗余技术、系统的可靠性高，因此，具有极强的带不平衡负载的能力和重要的应用价值。这种方法比较适合于大功率输出场合，目前大多 UPS 厂家在大功率三相 UPS 中常采用的结构，缺点是这种电路结构元器件数多、成本高、控制较复杂^[6]。

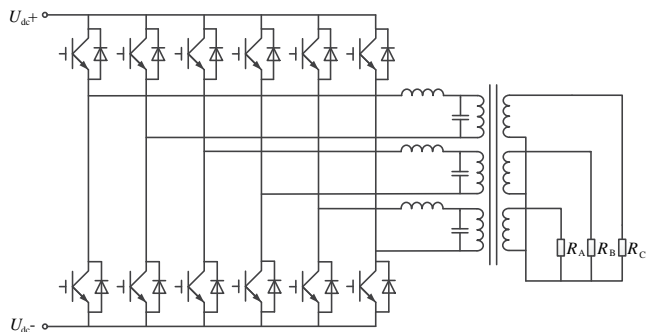


图 4 组合式三相逆变器拓扑结构

3 三相不平衡抑制综合解决方案

根据对称分量法，当负载不平衡时，三相不平衡输出电压可分解为三相对称的正序、负序和零序分量。通过对三相不平衡输出电压中负序、零序分量的抑制，可以大大增强逆变器系统的带不平衡负载能力^[12]。因此，以下分析的系统对

零序和负序分量分别进行抑制，有效地提高了三相 UPS 系统带不平衡负载的能力。

3.1 硬件系统

由上文可知，使用 $\Delta/Y0$ 变压器结构的三相 UPS 逆变电源的 $\Delta/Y0$ 变压器，带非线性负载时，非线性负载产生谐波会在次级绕组产生谐波损耗，而且会通过电磁感应传到初级，使初级也有谐波损耗，从而使变压器容量加大，因而体积重量较大，成本较高。本文所用三相 UPS 逆变电路拓扑结构如图 5 所示，在传统三相三桥臂逆变器的基础上加以改进，使用 $\Delta/Z0$ 变压器替代 $\Delta/Y0$ 变压器。

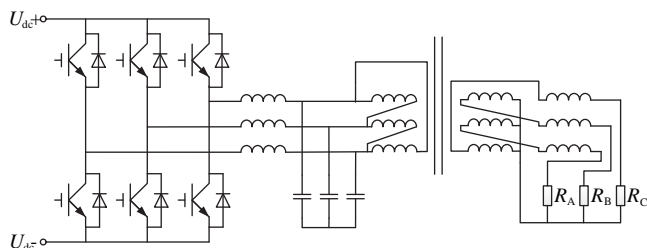


图 5 三相 UPS 逆变电路拓扑

如图 5 所示，使用的 $\Delta/Z0$ 变压器副边每相铁芯上的绕组分为上、下相等匝数的两部分，用曲折形连接分别接不同的相电压。当 $\Delta/Z0$ 变压器线输出端加入三相正序、负序电压时，Z0 型变压器每一铁芯柱上产生的磁势是两相绕组磁势的向量和。三个铁芯柱上的合成磁势相差 120° ，是一组三相平衡量。三相磁通可在三个铁芯柱上互相形成磁通路，磁阻小、磁通量大、感应电势大，呈现很大的励磁阻抗。当 $\Delta/Z0$ 变压器输出端加入零序电压时，在每个铁芯柱上的两个绕组产生的磁势大小相等，方向相反，合成的磁势为零，三相铁芯柱上没有零序磁通。零序磁通只能通过外壳和周围介质形成闭合回路，磁阻很大，零序磁通很小，所以零序阻抗也很小^{[7][8]}。变压器次级绕组的 Z0 接法可以保证给负载不平衡所产生的中性电流提供一个通路，并且不会将零序电流传递回初级。而初级 Δ 形，不仅能抑制三次谐波，还不会因负载不平衡时所产生的零序电流在初级线圈内形成环流而发热。三桥臂逆变器带 $\Delta/Z0$ 变压器，可以有效解决零序电流带来的三相电压输出不平衡。

3.2 软件算法

UPS 带平衡负载运行时，基于同步旋转坐标系的 PI 控制器能使输出电压很好地跟踪参考正弦信号，但是，这种控制器在不平衡负载下的补偿作用是有限的。而在 UPS 带不平衡负载运行时，使用三相静止坐标系控制器直接控制正、负序分量，可以对不平衡负载下进行补偿，但是这种控制器理论上不可能实现输出电压稳态无静差^[2]。

为此，本文使用两组 PI 控制器，一组在同步旋转坐标系下的 PI 控制器用于正序分量调节，另一组在反向旋转坐标系

下的 PI 控制器补偿负序分量的影响。这种方法通过抑制负序电压，可以改善逆变器输出在不平衡线性负载下运行的性能。本文采用以给定电压频率同步旋转坐标系 (d-q 轴系) 中的控制器进行调节，经三相静止 / 二相旋转坐标变换，三相输出电压正序分量变为 2 个直流量。参考量和输出电压正序分量的反馈量都是直流量，同步旋转坐标系 PI 控制器的积分作用，能迫使正序输出量无静差地跟踪参考量。

如图 6 所示，采集三相电压和电流信号，经正序、负序旋转坐标变换到两相同步旋转 d q 坐标系中。并且为保证动态特性，对正序、负序信号都采用输出电压外环、电感电流内环 (状态反馈) 的双闭环控制。之后，对正负序控制器输出的控制信号，分别进行正负序 d, q 反变换，将控制量进行叠加，载波调制后控制逆变器开关管。由于不希望输出电压中有负序分量，因此，负序控制器中的给定值为零，从而使逆变器输出电压不含有负序分量，再配合 $\Delta/Z0$ 变压器，解决了 UPS 逆变器带不平衡负载而产生的零序电压和负序电压问题，使系统可带不平衡负载。

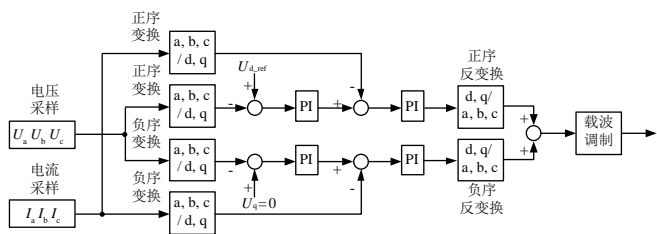


图 6 输出电压正负序控制框图

4 实验结果

为了验证控制方案的正确性与有效性，在容量为 60kVA 的三相 UPS 样机上进行了试验。控制平台采用 TI 的浮点 DSP 芯片 TMS320F28335。UPS 中的逆变器和负载参数如下：直流母线电压为 390 V，输出参考电压设定为峰值 311V、频率 50 Hz；A 相负载为纯阻性满载、B 相负载为纯阻性半载、C 相空载。调制方法采用载波调制法，其整机拓扑如图 7 所示，三相电流电压波形如图 8、图 9 所示。

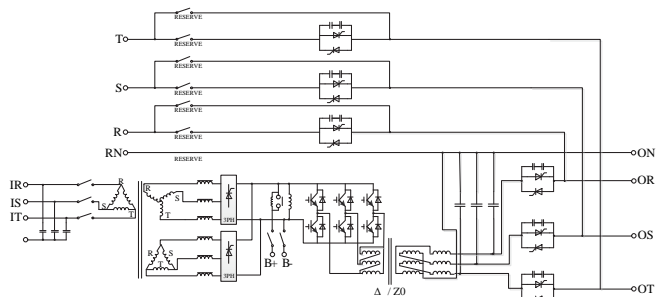


图 7 三相大功率 UPS 系统

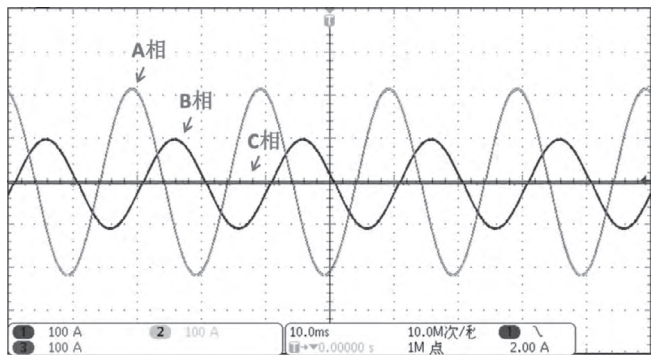


图8 不平衡负载电流波形

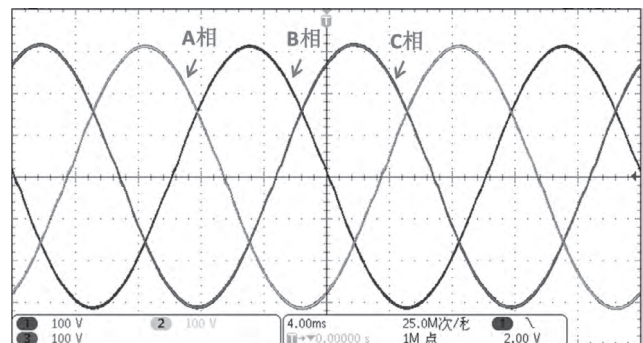


图9 不平衡负载电压波形

表1为60kVA三相UPS系统在不同负载情况下的三相输出电压。从表1中数据可以看出，本文设计的三相UPS系统在三相平衡负载和各种不平衡负载情况下，都可以将逆变电源的三相输出电压进行控制，说明了本文所设计的三相UPS系统的有效性和合理性。

表1 三相UPS系统在不同负载情况下的三相输出电压

负载	输出相电压/V		
	U_A	U_B	U_C
空载	220.1	220.2	220.1
三相平衡负载	219.9	219.5	219.7
A相满载, BC相空载	218.6	220.5	221.8
A相半载, BC相空载	219.3	220.8	221.6
AB相满载, C相空载	218.6	218.9	221.7
A相满载, BC相半载	218.9	220.2	220.8
A相满载, B相半载, C相空载	218.8	219.8	221.8

5 结论

本文对三相输出电压不平衡的机理和常规的解决方案进行了系统的分析。并在常规解决方案的基础上，提出了一种新型的UPS三相不平衡抑制综合解决方案。在原有的使用 $\Delta/Y0$ 变压器方案的基础上，改为利用 $\Delta/Z0$ 型变压器为三相不平衡负载的零序电流分量提供通路，解决了三相不平衡电压

中零序电压的问题；再通过设计正序、负序双PI控制器，抑制不平衡负载中负序电压分量，解决了负序电压的问题。综合两者，保证了在UPS三相逆变器在带不平衡负载时仍能维持三相平衡的输出电压。本文所提出的控制方法简单、易行，且与传统的UPS三相逆变器的控制相兼容，可推广应用于现有三相UPS产品的改造和构建高性能的三相UPS系统。

参考文献

- [1] 陈志强, 刘宏伟, 胡桂霞, 杨森. 浅谈三相负载不平衡的危害及对策[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 04: 70-71.
- [2] 彭力, 白丹. 三相逆变器不平衡抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 174-178.
- [3] 孙进, 宋聚明, 卢家林, 苏彦民. 针对不平衡负载三相逆变电源控制方法的研究[J]. 电工电能技术, 2003, 22(1): 29-31, 60.
- [4] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 赵巍, 郭小强. 三相四桥臂逆变器控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 24: 41-46.
- [5] 曹太强, 祁强, 王军. 三相逆变电源不平衡负载控制方法的研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 04: 50-55.
- [6] 陈道炼, 李旭, 张蓉, 张海涛. 组合式三相高频脉冲直流环节逆变器研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 75-79.
- [7] 李勇. Z型变压器的特点及其试验方法[J]. 宁夏电力, 2009, 02: 16-17+39.
- [8] 黄焕鹏. Z型接地变压器在谐振接地系统中的运用[J]. 广东输电与变电技术, 2007, 06: 21-24.
- [9] 刘德红, 汪光森, 胡安, 郭俊华. 三相逆变器在不平衡负载下的2种调制策略对比[J]. 电力自动化设备, 2009, 01: 41-45.
- [10] 陈伟, 肖飞, 王恒利, 刘计龙. 不平衡负载时三相逆变器控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2014, 06: 15-17.
- [11] 廖慧, 张波, 陈艳峰. 三相UPS输出电压不平衡控制的研究与实现[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 09: 51-56.
- [12] 刘云潺, 黄纯, 欧立权, 赵伟明. 基于dq变换的三相不平衡电压暂降检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 03: 72-76.

作者简介

叶彬城, 1973年, 男, 福建漳州龙海, 中航太克(厦门)电子股份有限公司, 工程师, 学士, 主要研究方向是逆变器与UPS、APF、SVG等