

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.018

## 集中式飞机外部供电架构及关键参数分析

曹剑坤 杨彬彬 刘海春 毛玲 谢少军

(南京航空航天大学自动化学院,南京,210016)

**摘要:**单独式供电结构的飞机外部交流供电方案存在静变电源数量多、管理和维护困难、成本高以及使用率低等缺点。本文提出了基于 400 Hz 电力系统的集中式飞机外部供电设计要求和设计方法,并对其中的关键技术进行分析,包括 400 Hz 电力系统的结构及功能分配、母线电压等级、配电结构和潮流分析等。以上海浦东国际机场 1 号航站楼为实例进行了 400 Hz 集中式供电系统的方案设计和参数分析。计算和仿真结果表明基于 400 Hz 电力系统的集中式飞机外部供电可保证供电可靠性和电能质量,同时可以降低成本,提高供电灵活性和设备利用率。结果证明了本文所提方案的合理性。

**关键词:**集中式飞机外部供电;系统架构;电压等级;潮流分析;400 Hz 电力系统

**中图分类号:**TM711      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2016)01-0114-08

## Structure and Key Parameters of Centralized Ground Power Supply for Aircrafts

*Cao Jiankun, Yang Binbin, Liu Haichun, Mao Ling, Xie Shaojun*

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

**Abstract:** The ground power supply for aircrafts based on independent structure has many shortcomings such as vast numbers of ground power units, difficult administration and maintenance, high cost and low utilization rate. This paper proposes the design requirements and design method of centralized ground power supply for aircrafts based on 400 Hz electric power system. The key technical problems are discussed such as the structure and functions of the proposed 400 Hz electric power system, the voltage class of busbar, the power distribution structure and the load flow analysis. Taking the Terminal 1 of Shanghai Pudong International Airport for example, this paper analyzes the structure and key parameters of 400 Hz centralized power supply system. The practical calculation and simulation results illustrate the rationality of the structure and parameter design. The results also indicate the feasibility of the centralized ground power supply based on 400 Hz electric power system, because it can guarantee the reliability and quality of power supply, reduce the cost, and improve the flexibility of power supply and the utilization rate of installations.

**Key words:** centralized ground power supply for aircrafts; system structure; voltage class; power flow analysis; 400 Hz electric power system

**基金项目:**中央高校基本科研业务费青年科技创新基金(NS2015033)资助项目。

**收稿日期:**2015-01-12;**修订日期:**2015-11-24

**通信作者:**谢少军,男,教授,博士生导师, E-mail:xsj@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**曹剑坤,杨彬彬,刘海春,等.集中式飞机外部供电架构及关键参数分析[J].南京航空航天大学学报,2016,48(1):114-121. Cao Jiankun, Yang Binbin, Liu Haichun, et al. Structure and key parameters of centralized ground power supply for aircrafts[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1):114-121.

飞机在地面通电检查、地面起动机以及设备维护时需要 115 V/400 Hz 制式的外部供电电源<sup>[1-4]</sup>。静变电源具有输出电能质量高、无排放、低噪音及高效率等优点,已成为主要的飞机外部电力保障设备<sup>[5-8]</sup>。目前的飞机外部电源为单独式供电结构,每个停机位配备一台或互为备份的两台静变电源。单独式供电结构的各供电端之间相互影响小,但是存在静变电源数量多、供电端设备体积重量大、购置和维护成本高以及设备使用率低等缺点。为克服上述缺点,飞机外部电源可借鉴工频(50 Hz 或 60 Hz)电力系统,采用集中式供电方案。基于电力系统的集中式飞机外部供电方案不但可降低系统成本和体积重量,而且可提高供电可靠性和灵活性。

工频电力系统的应用已很成熟,而关于 400 Hz 中频集中式飞机供电的相关研究较少。文献[9]提供了一种集中式供电解决方案,该方案主要针对维修机库进行飞机外部供电,解决了小范围集中供电的具体工程问题。该集中供电采用的低压配电方案无法满足较大供电覆盖范围(如机场或航站楼)的供电距离及功率等级需求,也尚未能够在电力系统层面考虑 400 Hz 供电的理论及技术问题。国外对 400 Hz 电力系统的研究主要针对舰船中 400 Hz 用电设备的集中式供电,其设计方法和思路对本文有一定的参考价值。文献[10]介绍了美国海军船舶局在“帝默曼”号导弹驱逐舰上进行的关于舰船 400 Hz 电力系统的相关研究。它通过提高电源频率实现了舰船电力系统轻型化,但限于当时的电力电子技术水平,该系统存在着电站发电机轴承易损坏、噪声大及与岸电不匹配等问题。文献[11]结合航空母舰的飞机供电问题提出了 400 Hz 中压供配电系统的“统一设备标准”,该中压系统采用电动发电机组将航母的 60 Hz 中压电力转换为 400 Hz 低压交流电,再经配电中心后采用中压交流母线进行电能传输,最后在供电点附近进行降压、线缆压降补偿和滤波后给飞机供电。该实例中采用传统电动发电机组进行频率变换,采用串联电容补偿线缆压降。

制约用于飞机外部供电 400 Hz 电力系统的一个重要原因在于飞机设备对供电电能质量和可靠性有较高要求,而大容量、高品质 400 Hz 电源的实现具有较大技术难度。现代电力电子技术的发展使得大功率、高电压的工频到 400 Hz 电力的可靠变换成为可能<sup>[12-14]</sup>。基于电力电子设备的电能质量控制技术的发展也为供电端的高品质电能输出

奠定了基础<sup>[15-17]</sup>。因此对基于 400 Hz 电力系统的飞机外部供电系统的研究已越来越具有现实意义。本文基于电力系统理论并结合 400 Hz 供电的特殊要求,首先给出基于 400 Hz 电力系统的飞机外部供电体系的设计要求和设计方法,再针对其架构方案、系统功能分配、母线电压等级和配电方案等关键问题进行分析,最后结合实例进行配电网的潮流分析,并进行系统的仿真分析,得出 400 Hz 集中式供电系统的原理方案。

## 1 集中式飞机外部供电系统

### 1.1 设计要求

与传统工频电力系统的设计相比,基于 400 Hz 电力系统的集中式飞机外部供电设计要求较高,主要体现在以下几点:

(1) 400 Hz 供电系统的负载类型主要为飞机、雷达等关键设备,供电系统需要具备较高的可靠性和一定抗破坏能力。

(2) 400 Hz 供电系统主要用于机场和舰船等场合,其供电半径通常为几千米范围,基波频率的提高会导致较大的线缆压降,舰船上的 400 Hz 电力系统还需考虑体积重量问题。

(3) 400 Hz 供电系统的负载对电能质量有较高要求,对供电电压幅值、频率、波形、对称性和故障保护等有严格要求。

(4) 400 Hz 供电系统专用性强,负荷的分布、特性和运行参数较易统计,基于较详细的等效电路可对配电网进行优化设计。

因此,400 Hz 供电系统不可直接沿用传统公共配电网方案,需要对供电系统的构成进行分析以及对各部分的功能进行合理划分。

### 1.2 设计方法

根据集中式飞机外部供电系统的设计要求,本文提出的 400 Hz 电力系统的设计方法如下。

(1) 根据设计要求明确 400 Hz 电力系统的系统构成以及各部分功能分配,主要包括 400 Hz 电站,400 Hz 配电网和飞机供电端 3 大部分的整体规划。

(2) 确定电力系统中各部分设备的等值电路,如输电线缆、变压器和断路器等,为配电网电压等级设计和运行分析做准备。

(3) 分析供电系统的负载功率和负载分布,确定较合理的配电线路方案,可同时确定几种配电方案进行对比分析,选取较优方案进行后续设计。

(4) 根据供电半径和负载电压要求,并结合配电线路方案对配电网的电压等级进行设计。

(5)根据等值电路分析、配电线路方案、配电网电压等级和负载分布情况进行配电网的潮流分析,并确定电缆用铜量、系统损耗和短路电流等参数。

(6)根据上述潮流分析结果确定参数设计的合理性,如不合理或需进一步优化则返回步骤(3)进行设计。

## 2 关键问题分析

本节对400 Hz集中式飞机外部供电系统设计中的系统组成及功能分配、配电网电压等级和潮流

分析等关键问题进行详细阐述。

### 2.1 400 Hz 电力系统组成及功能分配

本文给出一种基于400 Hz电力系统的飞机外部供电系统结构方案,如图1所示。该系统由3部分构成,分别为400 Hz电站,400 Hz配电网和飞机供电端。电能由置于电站内的MVA等级静变电源或电动发电机组将公用电网的50 Hz电力转换为400 Hz中频电力,再经中频专用电网将电能配送至各飞机供电端。

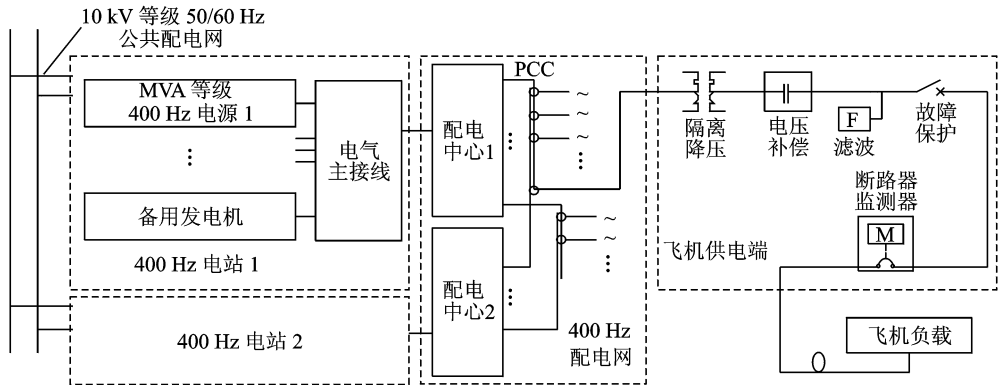


图1 基于400 Hz电力系统的飞机外部供电结构

Fig. 1 Ground power supply structure for aircrafts based on 400 Hz electric power system

400 Hz电站主要由400 Hz电源及其电气主接线构成。其中的400 Hz电源包括主电源和备用柴油发电机。主电源可由一台或多台并联的电动发电机或静变电源构成。采用电动发电机作为主电源具有可靠性高、过载能力强的优点,但是在体积重量、工作效率和维护成本等方面缺点明显。采用静变电源作为主电源具有体积重量小、工作效率高、无环境和噪声污染以及动态响应速度快等特点,是400 Hz电站主电源的理想方案。为降低单台静变电源的电流应力以及考虑冗余性,主电源可采用多台并联方式。400 Hz电站中备用发电机的选取应根据该供电系统中的重要负载容量确定,以保证主电源故障时重要负载的正常供电。在采用双电源点供电的400 Hz电力系统中,两个400 Hz电站互为热备份或直接并联供电。限于本文的目的和篇幅,本文对可用于400 Hz电站的电力电子技术不展开讨论。

400 Hz电站的供电可靠性要求较高,可考虑双母线的电气主接线。如图2所示的双母线接线在检修母线和扩建时不会中断对飞机供电端的供电。图中 $W_1$ 和 $W_2$ 表示两组母线,母线之间通过母线联络断路器QF相连接, $L_1$ , $L_2$ 和 $L_3$ 表示出

线。每个电源回路均经过一台断路器和两组隔离开关与两组母线连接,每条出线均经过一台断路器和两组隔离开关与两组母线相连。

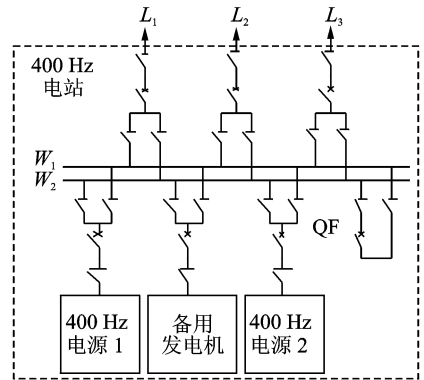


图2 双母线接线的400 Hz电站结构

Fig. 2 Structure of 400 Hz power station with duplicate-busbar

400 Hz电站发电容量应与400 Hz负载需求相适应,具有一定的热备份容量以保证系统稳定性和负载过载要求。负载需求应综合负载分布、负载数量及负载利用率等因素确定。长期的负荷统计是进行负载需求分析的重要基础。

400 Hz配电网由配电中心和配电线路构成,

配电中心根据配电支路数量和各支路功率将电能进行合理分配,电能通过配电线路传输至各飞机供电端。400 Hz 配电网包括开关设备、保护电器、测量仪表和母线等关键部件。

配电网方案的技术难点包括:(1)配电网的电压等级。目前的配电网电压等级相关标准均基于 50 Hz 市电,尚未有 400 Hz 配电网电压等级相关标准。对 400 Hz 配电网电压等级的选择可基于系统供电容量、供电半径和配电设备经济性等方面综合考虑。(2)配电线路的布线方案。配电线路布线方案的设计应结合具体实例,从性价比和可靠性方面进行综合分析。

飞机供电端由隔离降压变压器、电压校正器、滤波器、故障保护装置、断路器和检测器等构成。隔离降压变压器将交流传输母线电压转换为飞机外部供电额定电压。电压校正器主要用于补偿传输电缆压降,还兼顾对超出飞机外部供电标准规定时间和幅值的瞬时电压扰动进行校正。基于电力电子技术的动态电压恢复器或动态电压校正器可以作为电压校正器的技术方案。滤波器滤除传输线缆上的高频电压成分,保证系统的电磁兼容。故障保护装置、断路器和检测器一方面在供电网发生故障时保护和隔离飞机负载,另一方面保证交流传输母线的供电电压稳定,以使单个供电端或负载的故障不影响同网受电的其他飞机负载。

考虑到机场、机库和舰船等应用场合的空间和重量限制,飞机供电端应具有体积小、重量轻的特点。除此之外,飞机外部电源可允许的电压幅值范围较窄,对电压波形质量的要求较高,对电压的瞬时跌落或者抬升均有严格的恢复时间和幅值范围限制。因此,飞机供电端应具备输出电压波形质量高、动态性能好的特点。

## 2.2 400 Hz 配电网电压等级分析

配电网电压等级的选择对系统供电和配电部分的硬件参数设计和选型有直接影响。该参数为 400 Hz 电站提供输出电压指标,同时确定飞机供电端 400 Hz 电压校正器的校正范围。合理选择配电网电压等级是保证 400 Hz 电力系统整体效率和性价比的关键之一。

电压幅值参数可根据公用配电网的电压幅值进行选择,这有利于相关配电设备,如变压器、电力线路、断路器、开关柜和配电盘箱的经济选取。同时,电压幅值的选择与 400 Hz 电缆参数、公共交流母线传输距离和电缆末端的传输功率要求等有密切联系,应进行优化选取。表 1 为现有的工频中低

压电力系统配电网电压幅值。

表 1 工频电力系统配电网电压等级

Tab. 1 Voltage classes of power distribution network for 50/60 Hz electric power system

配电网类型	电压等级/kV
城市中压配电网	3, 6, 10, 20
船舶中压配电网	3.3, 6.6, 11
矿井中压配电网	3.3, 6, 10
低压配电网	0.38, 0.66, 0.69

飞机负载对供电电压的幅值范围要求较高,在远距离功率传输时,传输电缆允许电压降落的范围较小,可根据一定负载分布下配电线路电压降落的分析确定 400 Hz 专用配电网电压等级。假设负载在供电半径  $D$  的范围内均匀分布,则负载电流幅值由供电电源输出端至负载末端呈近似线性下降。如图 3 所示,400 Hz 配电网的最末飞机供电端电压降落  $\Delta U$  为

$$\Delta U = \frac{1}{D} \int_0^D [I(d) \times Z] dd = \frac{P_{\text{sum}}}{3U} + \frac{P_{\text{last}}}{3(U - \Delta U)} \times D \times \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{sum}}$ 和 $U$ 为集中式飞机外部电源输出功率和输出相电压; $P_{\text{last}}$ 为最末飞机供电端功率; $I$ 为交流传输母线的相电流; $Z$ 为配电线路阻抗(由单位等效电阻 $R$ 和单位等效电抗 $X$ 构成)。在正常工作状态下,若最末飞机供电端的电压幅值可满足供电标准,则飞机供电端电压补偿装置的电压补偿范围小,供电系统的整体效率高。由式(1)可得,在确定供电系统总功率和最末飞机供电端功率时,配电网的电压等级越高,则在相同电压降落条件下供电半径越大。但是随着配电网电压等级的提高,相关配电设备的成本增加较大,供电系统性价比下降。因此,依据式(1)选取配电网电压等级时,需要综合考虑配电网总功率、最末飞机供电端功率、配电线路电压降落、供电半径和线缆参数。

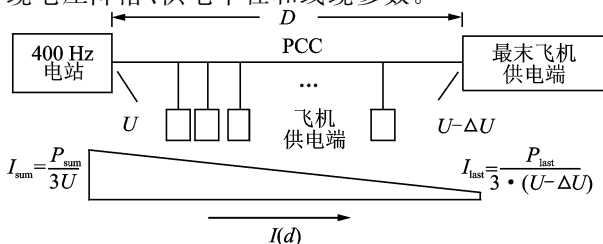


图 3 400 Hz 配电网中最末飞机供电端电压降计算  
Fig. 3 Voltage drop calculation of the last power supply terminal in 400 Hz power distribution network

根据飞机外部静变电源功率等级的要求和一般机场登机桥分布范围,本文集中式飞机外部供电系统的功率等级考虑为 1.5~2 MVA,供电半径考虑为 1~2 km,最末飞机供电端功率考虑为 90 kVA,可满足常用窄体客机的外部供电需求。根据 GJB 572A-2006 和 MH/T 6018-2014 中对飞机外部电源电压幅值的规定,其稳态电压有效值不得低于 113 V,不得高于 118 V。若集中式飞机外部电源的输出端等效电压有效值为 120 V,则配电网中最末飞机供电端的电压降落标幺值最大允许为 0.058 p. u.。

表 2 为 400 Hz 配电网不同电压等级选取方案的对比。电压等级选取过低时,传输线缆的电流较大,线缆较粗并且供电半径不足。电压等级选取过高时,供电半径较大,但增加了相关配电设备成本。当配电网电压降落和系统容量确定后,通过供电半径的对比可选定满足要求的配电网电压。本文选取的 400 Hz 配电网电压等级为 3 kV,在飞机供电端处选用变比为 15:1 的降压变压器。

表 2 400 Hz 配电网电压等级选取方案比较

Tab. 2 Voltage class comparison of 400 Hz power distribution network

系统容量 / MVA	电压等级 / kV	供电半径 / km	阻抗参数 / ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	线型 (7 芯)	最大电流 / A
1.5	2.40	1.24	0.229+j0.248	AWG 1#	380
	3.00	1.76	0.277+j0.250	AWG 2#	300
	3.30	2.13			
	4.16	2.96	0.345+j0.250	AWG 3#	240
	6.00	4.29			
	6.60	5.20	0.55+j0.269	AWG 5#	150
2.0	10.00	8.02	0.865+j0.286	AWG 5#	95
	2.40	1.04	0.187+j0.244	AWG 0#	480
	3.00	1.48			
	3.30	1.79	0.229+j0.248	AWG 1#	380
	4.16	2.58	0.277+j0.250	AWG 2#	300
	6.00	3.95	0.441+j0.249	AWG 4#	190
	6.60	4.78			
	10.00	7.48	0.691+j0.276	AWG 6#	120

此外,配电网短路电流的大小与其电压等级的选取密切相关。提高配电网的电压等级可减小短路电流。对于 400 Hz 供电系统,当负载发生短路时,飞机供电端处应有相应的故障隔离措施,以避免对 PCC 造成影响。400 Hz 配电网短路电流的计算主要针对飞机供电端 PCC 处发生短路故障的状况。此时短路回路上的主要阻抗为 400 Hz 电源供电端变压器的等效阻抗和传输线缆的等效阻抗。根据以上参数可计算得到各飞机供电端 PCC 处的

短路电流,配电网电压等级的选择应保证其短路电流不超出系统和断路器可承受的水平。

### 2.3 配电网的潮流分析

在正常运行条件下,400 Hz 配电网采用单电源点开环运行。配电网以 400 Hz 电站为电源点,其电压的幅值相位已知、功率未知;以飞机供电端为负荷节点,该节点的功率已知,电压幅值和相位未知。配电网的潮流分析将根据电源点和负荷节点的已知量,并结合 400 Hz 线缆分布和各支路阻抗参数,求取电站的需求功率、飞机供电端的电压幅值相位以及各配电支路的电流等运行参数。

如图 4 所示,与  $i$  号飞机供电端相关的未知变量有 3 个:流入  $i$  号飞机供电端的电流  $I_i$ , $i$  号飞机供电端电压  $U_i$ (供电端隔离降压前的电压)以及  $(i-1)$  号到  $i$  号飞机供电端之间的传输电流  $I_{i-1}$ 。根据基尔霍夫定律可得

$$\begin{aligned} I_{i-1} &= I_i + I_{i+1} \\ U_{i-1} &= Z_{i-1} I_{i-1} + U_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $I_{i+1}$ 为  $i$  号到  $(i+1)$  号飞机供电端之间的传输电流; $U_{i-1}$ 为  $(i-1)$  号飞机供电端电压; $Z_{i-1}$ 为  $i$  号到  $(i+1)$  号飞机供电端之间的传输线缆阻抗。

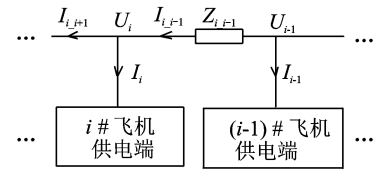


图 4  $i$  号飞机供电端的相关变量

Fig. 4 Correlated variables of power supply terminal  $i$

当飞机负载等效为恒功率负载,变压器等效为串联电抗时, $i$  号飞机供电端有

$$U_i I_i = S_i + jX_T I_i^2 = (P_i + jQ_i) + jX_T I_i^2 \quad (3)$$

式中: $S_i$ 为飞机等效负载功率,包括有功功率  $P_i$  和无功功率  $Q_i$ ; $X_T$ 为飞机供电端降压变压器的等效电抗。将其中的变压器功率部分转换为与短路阻抗  $Z_d$  相关的表达式后可得

$$U_i I_i = P_i + jQ_i + jZ_d |U_i I_i| \quad (4)$$

式(2,4)列出了与  $i$  号飞机供电端相关的相关参数方程。当该条馈线线缆上的飞机供电端的数量为  $n$  时,可列出  $3n$  个非线性方程组

$$\begin{cases} I_{i-1} = I_i + I_{i+1} \\ U_{i-1} = Z_{i-1} I_{i-1} + U_i & i=1, \dots, n \\ U_i I_i = P_i + jQ_i + jZ_d |U_i I_i| \end{cases} \quad (5)$$

式中:当  $i=0$  时, $I_{1,0}$ 为 400 Hz 电站出线端的电流,该电流为该条馈电线路上的最大电流,馈线线缆的线径根据该电流大小选取; $U_0$ 为 400 Hz 电站

出线端(即平衡节点)的电压; $Z_{1_0}$ 为 400 Hz 电站出线端至 1# 飞机供电端之间的传输线缆阻抗。

对于非线性方程组的求解一般采用迭代方式。迭代方法有牛顿-拉夫逊法、高斯-赛德尔法以及 P-Q 分解法。由于传输线缆的阻抗值与馈线线缆线径相关,在求解方程组时可先根据供电系统负载分布和配电网布线方案估算  $I_{1_0}$ ,进行线缆线径的初选以得到传输线缆阻抗参数  $Z_{i,i-1}$ ,再根据式(5)可求得各飞机供电端的电压以及各支路电流,最后求解方程组得到准确的  $I_{1_0}$ ,验证线缆线径的选取是否合适。如计算得到的  $I_{1_0}$  超过初选线缆的载流能力,则需增大线缆线径后确定传输线缆阻抗参数,重新求解方程组。

线缆用铜量与配电网布线方案和传输线缆线径相关,主要体现了配电网中传输线缆的体积重量。该项数据体现了集中式飞机外部供电系统中配电方案的性价比,是优化选取配电网布线方案的依据之一。在舰船等对体积重量有严格要求的使用场合,该项数据具有较大的重要性。

假设所用线缆截面积为  $S_A$ ,单个 400 Hz 电站的出线数量为  $k$ ,第  $q$  条馈电线路的线缆长度为  $l_q$ ,则配电网总体积  $V$  为

$$V = m \sum_{q=1,2,\dots}^k l_q S_A \quad (6)$$

考虑到飞机停靠位置的不同分布,所用线缆截面积  $S_A$  统一以最大输出电流的馈电线路截面积选取。考虑到供电系统的可靠性, $m$  为配电网冗余系数。如采用双电源树干式配电线路的每个飞机供电端有 2 条互为备份的馈电线路,则  $m$  选取为 2。

传输线缆的损耗与传输线缆型号、配电网布线方案以及负载类型和分布情况相关,是 400 Hz 配电系统经济运行的重要参考数据,体现了集中式飞机外部供电系统中配电方案的效率。

第  $q$  条馈线线缆上的电能传输损耗  $S_{\text{loss}_q}$  可表示为

$$S_{\text{loss}_q} = \sum_{i=1,2,\dots}^n I_{i,i-1}^2 Z_{i,i-1} \quad (7)$$

线缆损耗分析仅需考虑单电源点的馈线线缆,该电源点的各条馈线线缆损耗之和即为配电网的线缆损耗。

### 3 机场 400 Hz 供电系统实例分析

为验证本文提出的 400 Hz 电力系统架构和参数分析的可行性和合理性,本文以上海浦东国际机

场 1 号航站楼 28 个停机位的集中式供电为例,在假设的配电网布线方案下对两种负载分布进行配电网运行分析。

上海浦东国际机场 1 号航站楼的 28 个停机位分布如图 5 所示,图中 1#~5# 停机位和 11#~23# 停机位为 18 个大型飞机停机位,6#~10# 停机位和 24#~28# 停机位为 10 个小型飞机停机位。如采用分布式的 400 Hz 静变电源供电,则小型停机位需固定配置两台互为备份的 90 kVA 地面电源,大型停机位需固定配置两台互为备份的 180 kVA 地面电源。该航站楼停机位处的飞机外部供电设备总容量高达 8 280 kVA。

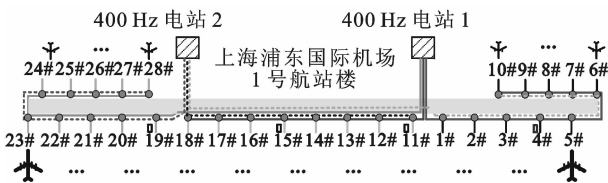


图 5 上海浦东国际机场 1 号航站楼停机位分布及线缆布线方案

Fig. 5 Aircraft stand distribution and wiring scheme of Terminal 1 in Shanghai Pudong International Airport

采用本文提出的基于 400 Hz 电力系统集中式供电方案,其配电网采用双电源树干式配电线路。根据配电网的路径较短原则:配电网路径按照各停机位的连线铺设,其中电站的出线路径垂直于停机位连线。两个 400 Hz 电站的出线数量均为 3。以 400 Hz 电站 1 为例,其中第 1 条馈线线缆作为 1#~10# 停机位的飞机供电端 PCC,第 2 条馈线线缆作为 11#~18# 停机位的飞机供电端 PCC,第 3 条馈线线缆作为 19#~28# 停机位的飞机供电端 PCC。400 Hz 电站 2 的 3 条馈线线缆与 400 Hz 电站 1 对称布置,这保证了每个飞机供电端均可由两个 400 Hz 电站供电。该配电网满足一级负荷供电要求,可靠性较高。

实例分析中假设两种负荷情况。负荷情况 1:同时刻下,小型飞机停靠数量为 20 架,大型飞机停靠数量为 8 架,小型飞机负载功率为半载 45 kVA,大型飞机负载功率为半载 90 kVA。负荷情况 2:同时刻下,小型飞机停靠数量为 10 架,大型飞机停靠数量为 4 架,小型飞机负载功率为满载 90 kVA,大型飞机负载功率为满载 180 kVA。400 Hz 供电系统的总容量为 1 620 kVA,此时的负荷率为 39%。负载均考虑为恒功率负载,功率因数为

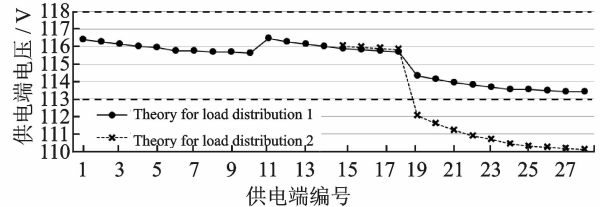
0.75。供电端降压变压器的短路阻抗为4%。根据上述负荷分析并考虑15%的冗余容量,需配置容量为1 863 kVA的两个400 Hz电站互为备份。在上述负荷假设条件下,采用400 Hz集中式供电系统的设备总容量仅为采用分布式400 Hz静变电源总容量的45%。

在上述假设负荷条件下需要针对最恶劣的负载分布进行配电网的运行分析。当飞机停靠位置集中于400 Hz电站1的远端并且大型飞机优先停靠于该电站的远端大型停机位时,从配电网的电能质量和效率角度考虑,这是该负荷情况下的最恶劣负载分布。

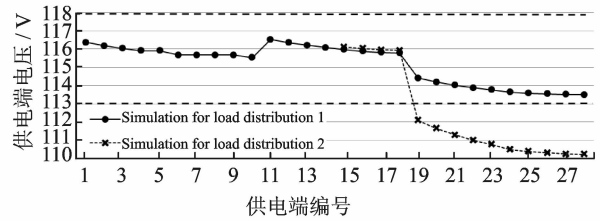
根据第2节分析可进行配电网运行的计算,对各飞机供电端电压幅值、支路最大电流、线缆损耗和线缆用铜量进行分析,并采用ETAP12.5仿真软件进行仿真验证。理论计算与系统模型中的参数均考虑了各支路线缆阻抗参数和各端口变压器等效短路阻抗参数。

两种负荷情况下各飞机供电端电压幅值的理论计算与仿真结果对比如图6所示。表3列出了两种假设负荷条件下的配电网运行参数对比,理论计算与仿真结果数据基本一致,说明理论分析合理。在负荷情况1下飞机供电端负载平均分布,供电端电压幅值均可满足飞机外部电源标准要求,配

电线的最大电流和线缆损耗较低。在负荷情况2下,飞机供电端负载远离电源点分布,大部分供电端电压幅值不满足飞机外部电源标准要求,配电线的最大电流和线缆损耗较高。同时在负荷情况2下,飞机供电端应采用电压校正装置将供电电压校正至正常范围内,由此也可见飞机供电端设备在400 Hz集中式供电系统中的必要性。



(a) Theoretical results



(b) Simulation results

图6 仿真结果与理论计算对比

Fig. 6 The comparison between simulation results and theoretical calculations

表3 400 Hz配电网运行参数对比

Tab. 3 Operating parameter comparison of 400 Hz power distribution network

参数	端口达标比例/%	最大电流/A	线缆型号(7芯)	线缆损耗/kVA	变压器损耗/kVA	线缆用铜量/m <sup>3</sup>
负荷1	仿真	100	131.7	20.0+j17.7		
	理论	100	131.6	21.0+j18.0	j64.8	1.65
负荷2	仿真	28.6	252.5	54.0+j49.7		
	理论	28.6	252.4	54.0+j48.7		

## 4 结束语

基于400 Hz电力系统的飞机外部供电具有高可靠性、高容量利用率等优点,他可满足整个机场的供电距离和功率等级要求,是一种高性价比的飞机外部供电方案。本文提出了基于400 Hz电力系统的飞机外部供电系统架构和基本参数设计方法,并基于该方法分析了浦东机场1号航站楼28个飞机供电端集中式供电的配电网结构和运行参数。

400 Hz电力系统的专用性强,不同的负荷分布情况对配电系统结构和运行参数的影响较大,可基于负荷分布统计数据建立更加详细和精确的负载等效电路和负载分布情况,然后进一步优化供电

系统配电方案。400 Hz电力系统的供电灵活高,本文实例中仅针对航站楼停机位进行集中式的飞机外部供电,400 Hz电力系统可进一步覆盖机场的远端停机位以及维修基地等。

## 参考文献:

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB 572A—2006. 中华人民共和国国家军用标准,飞机外部电源供电特性及一般要求[S]. 北京:国防科工委军表出版发行部,2007.
- [2] 中国民用航空总局. MH/T 6018—2014. 中华人民共和国民用航空行业标准,飞机地面静变电源[S]. 北京:中国民航出版社,2014.
- [3] 严东超. 飞机供电系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

- [4] 沈颂华. 航空航天器供电系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [5] 王雪钰,陈轶涵,邓翔,等. 高功率密度1 kVA 航空静止变流器[J]. 南京航空航天大学学报, 2014,46(1): 138-147.  
Wang Xueyu, Chen Yihan, Deng Xiang, et al. 1 kVA aeronautical static inverter with high power density[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 138-147
- [6] 张方华,龚春英,邓翔. 航空静止变流器的研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2014,46(1): 19-26.  
Zhang Fanghua, Gong Chunying, Deng Xiang. Review of aeronautic static inverter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 19-26.
- [7] Lopez A S, Zanchetta P, Wheeler P W, et al. Control and implementation of a matrix-converter-based AC ground power-supply unit for aircraft servicing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2076-2084.
- [8] Li Zixin, Li Yaohua, Wang Ping, et al. Single-loop digital control of high-power 400-Hz ground power unit for aircrafts[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 532-543.
- [9] 西安爱科赛博电气股份有限公司. 飞机机库并联冗余集中供电及配电补偿解决方案[EB/OL]. <http://www.cnaction.com/ActionPower-Airdefence.html>, 2015.
- [10] 章以刚. 舰船供电系统和装置[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2012.
- [11] Unified Facilities Criteria, USA. 400 Hertz medium voltage conversion/distribution and low voltage utilization systems[S]. UFC 3-555-01N, 2004.
- [12] 曹剑坤,谢少军. 移相与 SHEPWM 结合控制的级联型混合非对称三相变流器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 290-296.  
Cao Jiankun, Xie Shaojun. Multi-level hybrid asymmetric three-phase inverter with phase shift plus SHEPWM control scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 290-296.
- [13] 李子欣,王平,李耀华. 采用数字控制的400 Hz 大功率逆变电源[J]. 中国电机工程学报,2009,29(6):36-42.  
Li Zixin, Wang Ping, Li Yaohua, et al. 400 Hz high-power voltage-source inverter with digital control[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(6):36-42.
- [14] 刘春喜,马伟明,孙驰,等. 大功率400 Hz 逆变电源数字控制设计[J]. 电工技术学报,2011,26(1):100-107.  
Liu Chunxi, Ma Weiming, Sun Chi, et al. Digital control design of high power 400 Hz inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011, 26(1):100-107.
- [15] Lu Yong, Xiao Guochun, Lei Bo, et al. A transformerless active voltage quality regulator with the parasitic boost circuit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1746-1756.
- [16] 陈增禄,田苗苗. 串联型电压暂变补偿新拓扑及其控制方法研究[J]. 电网技术,2012,36(4):144-148.  
Chen Zenglu, Tian Miaomiao. A novel simplified voltage sag compensator topology and its control strategies[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 144-148.
- [17] Silva S M, da Silveira S E, Reis Ad S, et al. Analysis of a dynamic voltage compensator with reduced switch-count and absence of energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1255-1262.



