多电飞机电气系统可靠性网络拓扑分析法

边向南 周宇英

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191) (中国船舶工业集团公司 船舶系统工程部, 北京 100036)

马齐爽

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 多电飞机电气系统的拓扑结构是决定其可靠性的关键因素. 针对如何定量分析评估多电飞机电气系统拓扑结构可靠性的问题, 提出了一种定量分析多电飞机电气系统的拓扑方法及一种适用于多电飞机电气系统可靠性评估的算法. 该分析方法从系统承受故障能力的角度出发, 对系统结构进行拓扑分析并能得出定量的计算结果; 该可靠性评估算法利用欧式距离和熵权对分析结果进行多属性评估研究, 能够对不同网络结构系统的可靠性进行排序评定. 通过算例计算表明: 此分析方法和可靠性评估算法是有效的, 余度结构的电气网络结构可靠性较高, 是未来多电飞机电气网络结构的发展方向.

关 键 词: 多电飞机; 电气系统; 拓扑分析; 可靠性评估

中图分类号: TM 77

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008) 10-1210-04

Topology of power system reliability in more electric aircraft

Bian Xiangnan

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhou Yuying

(Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation, Beijing 100036, China)

Ma Qishuang

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The topological structure is one of the key factors affecting the reliability performance of the electrical power system (EPS) in more electric aircraft (MEA). A topology analysis method was adopted to build a universal algorithm of reliability evaluation. Qualitative results could be obtained through this method. Faults tolerance ability of EPS in MEA was focused in the analysis process. Quantitative indices was obtained through euclidean distance and entropy calculation of the analysis results in the evaluation process. Based on this reliability evaluation platform, qualitative analysis and quantitative indices calculation of different aircraft topological configurations were experienced using a sample system data. Result shows that the reliability level of redundancy power network is better than others and it is the basical configuration prototype of future aircraft power networks.

Key words: more electric aircraft; electrical power system; topological configuration; reliability

多电飞机采用全电化机载综合电力系统, 是电力集成技术[1]的具体应用, 较传统飞机具有更高的可靠性和战斗生存能力. 全电化机载综合电力系统是近年来在国防和民用领域出现的一项新概念, 它将运载器 (包括飞机、舰艇、战车等)内部的二次能源和动力机械能源全部统一为电能, 构成一个独立、灵活的电力系统. 与传统动力系统相比, 全电化机载系统具有很多突出优点, 例如噪音

收稿日期: 2007-10-18

作者简介: 边向南 (1982-), 男, 黑龙江大庆人, 博士生, bianxiangnan@gmail.com.

低、隐蔽性好, 控制方便、机动性好, 效率高、油耗小、航程大, 可靠性高、可维护性好、生命力强和战斗力明显提高等. 因此, 有关全电化机载系统的研究与应用在最近十来年受到了发达国家的高度重视[2]. 多电飞机的发展是随着其电气系统提升变化而来, 较传统飞机相比其电气系统为飞机整体的关键所在, 针对其电气系统的研究已经成为研究的热点. 由于多电飞机的电气化、自动化程度的日益提高, 对飞机电力系统供电的可靠性和生命力也提出了更高的要求[3].

评价一个飞机电网拓扑结构的优劣, 单纯从事故后重构恢复能力[4-7]进行评价是不够全面的, 还需要从故障承受能力的角度对可靠性进行严格的论证分析, 综合考核飞机电网及设备在各种工况下的性能, 以此作为依据判定各种拓扑结构类型的优劣及其在飞机电网的适用性. 本文采用拓扑分析的方法建立了飞机电网可靠性定量分析平台, 讨论了飞机电网拓扑结构评价的指标体系, 并选取了几类典型的飞机电力网络结构进行分析, 通过对网络拓扑的欧式距离和熵权进行多属性评估, 对比选择最优的网络结构方案.

1　网络拓扑分析方法

由于在实际系统中, 发电机汇流条之间的拓扑关系对系统的生存力起决定作用, 所以本文着重分析研究发电机汇流条的关系对系统的影响. 发电机之间的联系 (horizontal link)是由任意个拓扑边组成, 这类联系发电机之间关系的拓扑边定义为横向边 (horizontal edge). 在电气网络结构中发电机组与电气系统其余部分的联系定义为纵向连接 (vertical link), 其拓扑边为纵向边 (vertical edge). 在这里要假设在系统中每一个纵向联系仅为一条线缆, 故障被看作独立事件.

发电机汇流条的故障将引起电气系统 3种类型响应: ①电气系统没有响应, 即电气系统没有变化 *(N)*; ②由于可提供能量的变化, 电气系统需要重构 *(R)*; ③能量提供中断, 电气系统失效 *(F)*. 定义其故障数 m, $m = m_g + m_v + m_h$, 其中 m_g, m_v, m_h 分别为发电机故障, 纵向联系故障和横向联系故障. m 值范围在 $(1, M)$之间变化, 其中 $M = g + v + h$. 那么在 m 个故障下, 系统相应有 S种情况

$$S = \frac{M!}{m!\ (M - m)!} \tag{1}$$

其中 $k! = 1 \times 2 \cdots k$. 按照定义, 也可知

$$S = S_N + S_F + S_R \tag{2}$$

S_N 为系统在故障时没有响应的情况; S_F 为系统在故障时失效的情况; S_R 为系统在故障时需进行重构的情况. 在实际系统中, 故障时没有响应的情况有两种: ①故障发生在横向边, 没有引起系统响应 S_{N1}; ②由于发电机冗余, 故障时没有响应 S_{N2}, 即 $S_N = S_{N1} + S_{N2}$. 系统重构的情况有两类: ①发电机从系统内退出, 这类引发重构的情况为 S_{R2}; ②由于纵向边和横向边的同时故障而引起的系统同重构, 相当于发电机退出系统定义为 S_{R2}, 即 $S_R = S_{R1} + S_{R2}$. 定义 $P(N) = S_N/S$, $P(R) = S_R/S$, $P(F) = S_F/S$, 亦可知 $P(N) + P(R) + P(F) = 1$. 当 $m \geqslant M - 1$时, 所有的故障都能使系统失效, 而当 $m = 1$时, 容易得到 $S_N = M - g$, $S_{R1} = S - S_N$, $S_F = S_{R2} = 0$. 所以着重讨论当 $2 \leqslant m \leqslant M - 2$时系统的相应情况. 由文献 [1]可知

$$S = \sum_{m_g + m_v = 0}^{g+v} C_{g+v}^{m_g + m_v} \times C_h^{m_h} \tag{3}$$

2　可靠性评估原理

实际多电飞机电气网络拓扑可靠性方案评估属于多属性决策问题, 即有限方案的多目标决策. 对其进行评估比较决策大致分为以下几个步骤 (如图 1).

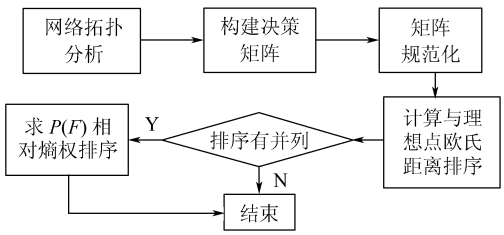

图 1　评估过程

文中, 选择 S最大值时 $P(N)$, $P(R)$和 $P(F)$作为一种拓扑结构属性值, 因为 S 值最大时特征最为明显, 当有两个 S相等时取其平均值作为属性值. 利用处理后的数据, 根据理想点求出各属性点与理想点的距离, 从而决定方案的优劣[8]. 利用式 (1)对向量进行规范化, 得出新的属性矩阵.

$$Z_{ij} = y_{ij} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{m} y_{ij}^2} \tag{4}$$

式中, Z_{ij}为属性矩阵向量值; y_{ij}为选取参数. 理想的拓扑结构属性值应该为 $P(N)_0 = 1$, $P(R)_0 = 0$和 $P(F)_0 = 0$, 那么理想点应该为 $(1, 0, 0)$. 求出各属性点与理想点欧式距离, 其欧式距离最短的方案为最优, 即可靠性最高.

$$d = \{[P(N)_i - P(N)_0]^2 + [P(R)_i - P(R)_0]^2 + [P(F)_i - P(F)_0]^2\}^{1/2}$$
$$i = 1, \cdots, n \tag{5}$$

当出现与理想点欧式距离相等的情况时, 进一步考虑计算系统的熵权进行比较. 熵 (entropy) 的概念源于热力学, 后由香农引入信息论, 现已在工程技术、社会经济等领域得到更多的应用. 熵是系统状态不确定性的一种度量. 当系统可能处于几种不同状态, 每种状态出现的概率为 P_i (i= 1, …, n)时, 该系统的熵定义为

$$E = -\sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i \qquad (6)$$

其中 $0 \leqslant P_i \leqslant 1$, $\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$. 由熵的定义可看出, 当 $P_i = \frac{1}{n}$, i= 1, …, n时, 即等概率的情形时, E 取得最大值为 $E = \ln n$. 在进行比较时, 决定系统关键指标在于 F 对系统相对重要度最小, 即系统失效情况重要度最低.

首先计算 F 的熵值:

$$e_F = -P(F)\ln P(F) \qquad (7)$$

表征指标 F 相对重要度的权为

$$W_F = \frac{e_F}{\ln n} \qquad (8)$$

3 网络结构算例分析

针对于未来多电飞机的电气网络结构研究最多的为以下这类余度结构模式 (如图 2), 其也是第四代战机采用的电气拓扑结构.

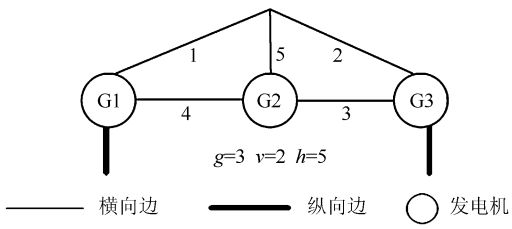

图 2 网络 1

而对于传统的网络结构, 飞机电气系统有以下几种形式 (如图 3). 其中针对于四代战机的余度结构模式电气系统拓扑分析方法最为复杂, 就以其为例进行分析方法的说明, 并与其他拓扑结构进行比较评估来验证算法的有效性.

任何一个电气系统的拓扑结构都可以分为相互独立两个部分, 一部分是发电机间没有相互联系的系统; 一部分是横向联系边. 图 2中的余度结构, 按照拓扑分割的思想进行分析, 把其系统结构分成两部分, 先不考虑中间 2号发电机, 则很容易得到拓扑结构图 4 这个拓扑结构也可分为两部分, 两个没有相互联系的电机系统和横向联系边. 此时再来考虑 2号发电机, 就可以看作同时为没有相互联系部分中 1号、3号发电机的余度.

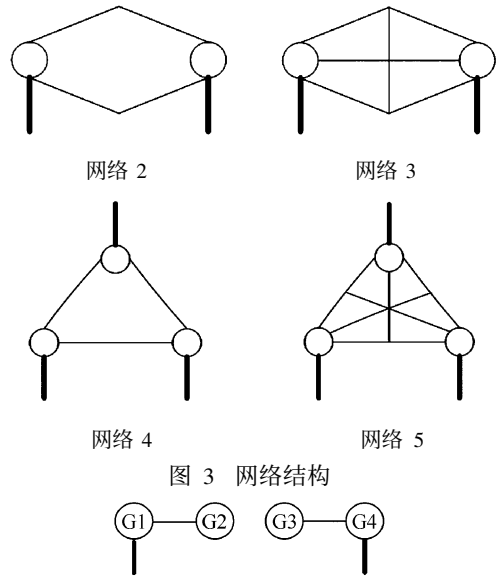

图 3 网络结构

图 4 余度结构网络

由图 3可知, g= 3, v= 2, h= 5, 其中 $g+v$= 5, 则 $m_g + m_v$ 存在由 0到 5共 6种情况, 下面分别讨论 6种情况下系统的响应: ①$m_g + m_v$= 0时 m_h= m; ②$m_g + m_v$= 1时 $m_h = m - 1$; ③$m_g + m_v$= 2时 $m_h = m - 2$; ④$m_g + m_v$= 3时 $m_h = m - 3$; ⑤$m_g + m_v$= 4时 $m_h = m - 4$; ⑥$m_g + m_v$= 5时 $m_h = m - 5$.

在 ①情况下, 发电机和系统的纵向联系没有故障, 所有故障都发生在横向联系中. 由上文可知, 横向联系的的故障不影响系统能量的提供, 所以在此种情况下系统没有响应.

在 ②情况下, $m_g + m_v$= 1说明有一个故障发生在发电机或系统的纵向联系, 由图 5可知任何一发电机退出系统都不能引起系统重构, 系统的响应都属于 S_N, 共有 3种情况.

只有 $m \geqslant 3$时, 纵向边和横向边同时发生故障, 相当于发电机退出系统引起 S_{R2}型重构, 当 m 为其它值时系统的响应情况见表 1.

表 1 评估计算结果

m	S	S_{N1}	S_{N2}	S_N	S_{R1}	S_{R2}	S_F	$P(N)$	$P(R)$	$P(F)$
1	7	7	0	7	0	0	0	1	0	0
2	45	26	16	42	2	0	1	0.94	0.04	0.02
3	120	56	35	91	14	4	11	0.76	0.07	0.09
4	210	51	40	91	40	34	45	0.43	0.35	0.22
5	253	1	26	27	60	70	96	0.11	0.51	0.38
6	210	0	8	8	50	32	120	0.04	0.39	0.57
7	120	0	1	1	22	6	91	0.01	0.23	0.76
8	45	0	0	0	4	0	41	0	0.09	0.91
9	10	0	0	0	0	0	10	0	0	1

在 ③情况下, $m_g + m_v$ = 2意味有两个故障发生在发电机或系统的纵向联系, 其余故障都发生在系统的横向联系中. 只有在系统的两个纵向联

系都发生故障的时候, 系统提供能量中断系统失效, 所以属于 S_F 的情况只有一种. 两个故障分别发生在 G1, G2或 G3, G2上会引起 S_{R1}情况, 由于 G2余度作用, 当故障发生在 G1, G3时也不引起重构. S_{R2}和 S_{N1}要由具体故障发生在横向边的数值确定. 其中决定 S_{R2}的是横向边和纵向边的失效相当于发电机的失效情况, 具体计算由 m 具体值来确定, 见表 1.

在 ④情况下, 分析拓扑结构图 3能够导致系统失效的情况有 6种, 导致系统进行 S_{R1}响应的 4种情况, 具体值见表 1.

在 ⑤⑥情况下, 故障都能导致系统失效.

所以

$$\left.\begin{aligned} S_F &= S_F(3) + S_F(4) + S_F(5) + S_F(6) \\ S_{R1} &= S_{R1}(3) + S_{R1}(4) \\ S_{R2} &= S_{R2}(2) + S_{R2}(3) \\ S_{N1} &= S_{N1}(1) + S_{N1}(2) + S_{N1}(3) \\ S_{N2} &= S_{N2}(2) + S_{N2}(3) \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

表 1列出了在不同故障数目情况下, 系统的定量反映情况. 能够观察到, 当 m 时 S 值最大, 系统的反应最为复杂, 此时的情况也最能够体现出系统的特性. 所以, 选择 $m = 5$时的 $P(N)$, $P(R)$ 和 $P(F)$作为一种拓扑结构属性值, 再利用式 (4) 得出属性矩阵.

利用此分析方法也可以对传统的飞机电气系统拓扑结构进行分析, 接下来把传统的飞机电气系统拓扑结构与余度拓扑结构进行评估比较. 通过建立网络的决策矩阵, 求得各拓扑网络结构与理想点的欧式距离.

由表 2可知网络 1为最优方案, 其中网络 3优于方案 2; 网络 5优于网络 4, 这与文献[4]中分析的结果一致, 可见此种方法是正确的. 但是无法进行网络 2与网络 4的比较, 因为其距理想点的欧式距离是相等的. 如果要对网络 2与网络 4排序, 可以利用式 (6)、式 (7)和式 (8)计算系统的熵权进行比较. 依据熵的性质可以判断, W_F 越大指标 F 的相对重度越小. 计算得 $W_{F2} = 0.28$, $W_{F4} = 0.34$ ($n = 3$), 可见网络 4优于网络 2.

表 2　各方案距离及优选顺序

方案序号	欧式距离	排序
1	0.62	1
2	1.20	4
3	0.75	2
4	1.20	4
5	1.01	3

从算例计算结果来看, 余度拓扑结构优于传统的飞机电气系统网络结构. 事实上, 欧美等国空军及相关科研机构, 正在开展以余度拓扑结构为基本型式的新一代全电飞机的电气系统研发和示范工作. 这种结构的最大优点是便于常规续航工况下实现双路甚至多路供电, 提高可靠性水平和飞机的生命力水平.

4　结束语

本文利用网络拓扑分析的方法, 建立了对飞机电网可靠性定量分析的通用算法, 经实例验证是较为有效的. 通过对几种飞机电网的对比分析, 得到余度拓扑结构的可靠性水平高于其他形式的电网结构, 是未来多电飞机电网结构优化的优先选择. 利用该种分析方法, 为新的网络拓扑结构的探索提供了初步的评价标准.

参考文献 (References)

[1] 马伟明. 电力集成技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 16-20
MaWeiming. Power system integeration technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 16-20 (in Chinese)

[2] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学学部. 学科发展战略研究报告(2006年-2010年)电气科学与工程[M]. 科学出版社, 2006: 61-71
National Nature Foundation of China Department of Engineering and Material Science. Science development stratagem research report (2006-2010) electrical science and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006: 61-71 (in Chinese)

[3] MaldonadoMiguelA, ShahNarenM, CleekKeithJ, et al. Power management and distribution system for a more electric aircraft (MADMEL)-program status[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 1999, 14(12): 3-8

[4] Poroseva S, Woodruff S, Hussaini Y M. Topology of the generator bus in a warship integrated power system[C]// 2005 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005: 141-148

[5] Carroll Johnson, Nagaraj Keerthi C, Arapostathis Ari, et al. Dynamic reconfiguration preserving stability[C]// 2005 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005: 105-107

[6] Butler Purry K L, Sarma N D R. Self-healing reconfiguration for restoration of naval shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 754-762

[7] Butler K, Sarma N. General reconfiguration methodology for AC radial shipboard power systems[C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, 2: 1226-1230

[8] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 58-98
Yue Chaoyuan. Decision theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2002: 58-98 (in Chinese)

(责任编辑: 娄　嘉)