

飞机配电系统最优负载切除方法

巩建英^{1,2}, 谢蓉¹

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2. 长安大学 电控学院, 西安 710064)

摘要: 电力系统供电不足时, 可以切除过量的负载以保证系统的稳定性. 针对飞机电力系统供电不足的情况, 提出一种最优负载切除方法. 该方法考虑了飞机上关键负载的优先供电要求, 将负载优先级权重因子引入负载方程中, 把负载切除问题转换为多目标优化问题. 通过求解该优化问题, 克服了负载切除的随机性和盲目性, 满足了关键负载的优先供电要求. 实验结果验证了所提出的负载切除方法的正确性和有效性.

关键词: 负载切除; 优先级; 孤立系统; 飞机配电系统; 优化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Optimal load shedding method for aircraft electric distributed system

GONG Jian-ying^{1,2}, XIE Rong¹

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China. Correspondent: GONG Jian-ying, E-mail: gongjianying@tom.com)

Abstract: When power supply is insufficient in power system, the system stability can be warranted by shedding the excess loads. An optimal load shedding method is proposed for power supply shortage on the aircraft electric power system. The load shedding problem is formulated to the multi-objective optimization problem. The load weight priority factor is introduced into the load equation. To solve the optimization problem, the blindness and randomness of load shedding are avoided and the power supply priority of the vital loads is satisfied. Experiment results show the correction and effectiveness of the proposed method.

Key words: load shedding; priority; isolated system; aircraft electrical distributed system; optimization

0 引言

随着多电飞机相关技术的应用, 飞机将使用更多的电气负载, 消耗更多的电能^[1]. B767的发电机容量仅为250kVA, 而B787的发电机容量增加到1.4MVA^[2]. 电气负载数量和发电量的激增, 使飞机配电系统的设计变得越来越复杂. 当飞机电力系统供电不足时, 如何切除过量的负载以保证飞行关键负载的供电是一个具有挑战性的课题^[3].

针对供电不足的情况而进行负载切除是一种保证电力系统稳定工作的重要方法. Guilfoyle等^[4]提出的SCADA系统通过连续监控电力系统的重要参数来决定需要切除的负载. Concordia等^[5]研究了孤立小电力系统的负载切除. 与联网的大电力系统相比, 孤立的小电力系统抗干扰能力较差, 当供电不足时, 切除过量负载是最有效的解决途径.

目前, 针对电力系统供电不足或失稳而进行的负载切除, 已有多种优化方法^[6-9]. Momoh等^[6-7]分别对空间电力系统和舰船电力系统进行了研究, 其中对舰船电力系统负载切除采用了Everett优化技术^[7]. Everett优化技术的主要特点是通过使用一个效用函数来寻找一个最优的负载卸除机制, 以在满足系统约束的条件下卸除最少的负载而获得最佳的系统性能^[7]. Firouzfard等^[8]提出了一种基于遗传算法求解的最优化负载切除方法, 其主要特点是在保证电压稳定的前提下, 求解最小的负载切除量. Fernandes等^[9]提出了将优化负载功率流量作为目标函数, 通过放宽约束条件的限制来求得最小的负载切除量, 以保证电网的稳定工作.

相对于地面电力系统, 飞机电力系统和船舶电力系统都是孤立的小电力系统^[1,6,10-11]. 采用智能计算

收稿日期: 2013-02-23; 修回日期: 2013-05-09.

基金项目: 西北工业大学博士后研究项目(W004417).

作者简介: 巩建英(1980-), 男, 讲师, 博士后, 从事控制理论及应用、航空电力系统等研究; 谢蓉(1982-), 女, 讲师, 博士, 从事鲁棒控制、飞行控制的研究.

机系统切除过量负载的方法在这类小电力系统上更容易实现. 本文针对飞机电力系统出现电力不足的情况, 研究一种最优负载切除方法, 考虑了飞机电力系统自身的约束, 建立了飞机电力系统的模型, 将负载切除问题转化为一个多目标优化问题. 此外, 考虑到关键负载的优先供电要求, 在负载切除的优化问题中引入了负载的优先级参数, 定义了负载卸除的优先级顺序. 实验结果表明了该方法的有效性.

1 系统模型

飞机电力系统由电源、汇流条、配电电缆和大量的用电负载组成. 建立飞机电力系统数学模型, 需要考虑发电机输出功率、负载功率、汇流条电压、电流等约束条件对电力系统稳定性的影响.

1.1 电源模型

定义 1 对于有 n_g 台发电机的电力系统, 各发电机输出功率为 $P = [P_1, \dots, P_{n_g}]^T \in \mathbf{R}^{n_g}$, 无功功率为 $Q = [Q_1, \dots, Q_{n_g}]^T \in \mathbf{R}^{n_g}$, 功角为 $\Phi = [\delta_1, \dots, \delta_{n_g}]^T \in \mathbf{R}^{n_g}$. 若发电机能够稳定工作, 则应满足如下约束不等式^[9,12]:

$$P^{\min} \preceq P \preceq P^{\max}, \quad (1a)$$

$$Q^{\min} \preceq Q \preceq Q^{\max}, \quad (1b)$$

$$\Phi^{\min} \preceq \Phi \preceq \Phi^{\max}. \quad (1c)$$

其中: $P^{\min} \in \mathbf{R}^{n_g}$ 和 $P^{\max} \in \mathbf{R}^{n_g}$ 分别表示各发电机所允许的最小输出功率向量和最大输出功率向量, $Q^{\min} \in \mathbf{R}^{n_g}$ 和 $Q^{\max} \in \mathbf{R}^{n_g}$ 分别表示各发电机所允许的最小无功功率向量和最大无功功率向量, $\Phi^{\min} \in \mathbf{R}^{n_g}$ 和 $\Phi^{\max} \in \mathbf{R}^{n_g}$ 表示各发电机允许的最小功角向量和最大功角向量.

推论 1 电力系统的输出总功率 $P_t \in \mathbf{R}$ 描述为

$$P_t = \sum_{i=1}^{n_g} P_i, \quad (2)$$

进而可将电力系统功率余量 $P_\Delta \in \mathbf{R}$ 描述为

$$P_\Delta = \sum_{i=1}^{n_g} (P_i^{\max} - P_i) = P_t^{\max} \cdot (-P). \quad (3)$$

注 1 电力系统中的电压、功率、电流和角度等变量都是时间 t 的函数, 符号“ \cdot ”表示矩阵的点积.

1.2 汇流条模型

汇流条出现过压或欠压都会影响到与其连接的负载的工作. 物理上连接到汇流条上的电缆有通过电流的限制, 这里将其归结为流过汇流条的电流限制. 因此, 本文从电压和电流的限制方面定义汇流条模型.

定义 2 假设电力系统中有 n_b 个汇流条, 可将各个汇流条的电压和电流分别描述为 $V = [V_1, \dots, V_{n_b}]^T \in \mathbf{R}^{n_b}$ 和 $I = [I_1, \dots, I_{n_b}]^T \in \mathbf{R}^{n_b}$. 系统正常工

作时, 各个汇流条应满足如下约束不等式:

$$V^{\min} \preceq V \preceq V^{\max}, \quad (4a)$$

$$I \preceq I^{\max}. \quad (4b)$$

其中: $V^{\min} \in \mathbf{R}^{n_b}$ 和 $V^{\max} \in \mathbf{R}^{n_b}$ 表示各个汇流条允许的最小电压向量和最大电压向量, $I^{\max} \in \mathbf{R}^{n_b}$ 表示各个汇流条允许的最大通过电流向量.

1.3 负载模型

负载是飞机电力系统的终端用电设备, 电力分配最终通过控制负载的用电来实现.

定义 3 假设电力系统中有 n 个负载, 各个负载的功率为 $L = [L_1, \dots, L_n]^T \in \mathbf{R}^n$. 若相应的控制开关为 $K = [K_1, \dots, K_n]^T \in \mathbf{S}^n$, 则可将各个负载的接通功率 $C = [C_1, \dots, C_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 描述为

$$C = K \circ L, \quad (5)$$

所有负载的总功率 $L_t \in \mathbf{R}$ 描述为

$$L_t = K \cdot L. \quad (6)$$

注 2 集合 $\mathbf{S} = \{0, 1\}$, 符号“ \circ ”表示矩阵的 Hadamard 乘积.

若开关 K_i 断开, 则 $K_i = 0$; 若 K_i 闭合, 则 $K_i = 1$.

2 问题描述与计算

2.1 问题描述

正常情况下, 飞机电力系统能够为所有负载供电. 当电力系统供电不足时, 必须切除部分负载以防止电源过载工作. 飞机电力系统供电不足时的电力分配问题可归结为如下优化问题^[7,10]:

$$\min L_t; \quad (7)$$

$$\text{s.t. 式 (1), (4), } P_\Delta > 0. \quad (8)$$

考虑关键负载的供电需求, 保证向关键负载优先供电, 本文将优先级权重因子加入优化问题 (7) 和 (8) 中.

2.1.1 负载的优先级权重因子

飞机电力系统中负载优先级的划分必须与负载的供电需求结合起来. 负载的重要性是影响各个负载电力分配的最主要因素, 因此本文按下面的原则分配负载优先级:

1) 负载优先级赋值越小, 表示其优先级越高.

2) 根据负载的重要性, 将负载分为关键飞行负载、重要任务负载和非重要负载三类. 关键飞行负载的优先级最高, 其优先级赋值最小; 重要任务负载次之; 非重要负载最低.

3) 各个负载优先级的赋值是唯一的.

定义 4 假设电力系统中有 n 个负载, 考虑各个负载的重要性, 若各个负载的优先级描述为 $R = [r_1,$

$\dots, r_n]^T \in \mathbf{N}_+^n$, 进而, 可将各个负载的优先级因子描述为 $\Gamma = [\tau_1, \dots, \tau_n]^T \in \mathbf{R}^n$.

负载的优先级与优先级因子之间的关系式为

$$\tau_i = \frac{1}{r_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

此外, 在不同飞行阶段每个负载都有一个预置的工作状态. 例如, 第 2 号负载在起飞、爬升和巡航等 3 个飞行阶段预置为“1”, 表示需要接通工作; 在其他几个飞行阶段预置为“0”, 表示不需要工作. 负载工作状态的预置间接影响了负载的优先级, 因此, 有必要分析不同飞行阶段的优先级因子.

若某飞机具有地面、起飞、爬升、巡航、执行任务、下降、着陆和应急等 q 个飞行阶段, 则飞行阶段可描述为 $M = [m_1, \dots, m_q]^T \in \mathbf{S}^q$. 若当前为第 j 个飞行阶段, 则 $m_j = 1$; 同时其他飞行阶段的参数取为 0.

根据定义的 q 个飞行阶段和负载个数 n , 可将各个负载在不同飞行阶段的预置状态描述为矩阵

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1q} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nq} \end{bmatrix} \in \mathbf{S}^{n \times q}.$$

当前飞行阶段下各个负载的预置的工作状态值 $S_j = [s_{1j}, \dots, s_{nj}]^T \in \mathbf{S}^n$, 可由下式计算:

$$S_j = SM. \quad (10)$$

若考虑各个负载在不同飞机阶段的预置状态, 则优先级因子 $\Gamma \in \mathbf{R}^n$ 可重新表达为优先级权重因子 $W = [w_1, \dots, w_n]^T \in \mathbf{S}^n$, 其计算公式为

$$W = \Gamma \circ S_j. \quad (11)$$

2.1.2 引入优先级权重因子的优化问题

系统对负载的控制主要通过开关来执行. 将优先级权重因子引入控制开关 $K \in \mathbf{S}^n$ 中, 各负载对应的控制开关向量可重新表达为 $\tilde{K} = [\tilde{K}_1, \tilde{K}_2, \dots, \tilde{K}_n]^T \in \mathbf{S}^n$, 其计算公式为

$$\tilde{K} = K \circ W \circ R. \quad (12)$$

定义 3 中的控制开关变为 $\tilde{K} \in \mathbf{S}^n$ 后, 负载模型重新定义如下.

定义 5 假设电力系统中有 n 个负载, 各个负载的功率为 $L \in \mathbf{R}^n$, 各负载所对应控制开关的状态为 $\tilde{K} \in \mathbf{S}^n$, 可将各负载的接通功率 $\tilde{C} \in \mathbf{R}^n$ 描述为

$$\tilde{C} = \tilde{K} \circ L, \quad (13)$$

所有负载的总功率 $L_t \in \mathbf{R}$ 描述为

$$\tilde{L}_t = \tilde{K} \cdot L. \quad (14)$$

为了形象地说明负载的特性和供电需求, 制定了一个包括负载的控制开关、优先级、在各个飞行阶段的预置状态、功率和安装位置等因素的负载定义表(见表 1).

表 1 负载定义表

编号	控制开关		优先级	负载在各个飞行阶段下的预置工作状态								功率/kW
	所属单元	名称		地面	起飞	爬升	巡航	着陆	下降	任务	应急	
1	L-PPDU	L-TC1	2	1	0	1	1	1	1	0	1	5
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8		L-TC8	3	1	0	1	1	1	0	0	0	8
16	ELMC1	E1-SSPC1	6	1	1	1	1	1	1	1	1	0.05
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
68		E1-SSPC53	156	0	1	1	1	0	1	1	0	0.1
191	ELMC4	E4-SSPC1	201	1	1	1	1	1	1	1	0	0.03
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
240		E4-SSPC50	176	0	1	1	1	0	1	1	0	0.2

考虑负载的优先级以及飞机的飞行阶段, 应保证为优先级较高的负载供电. 式 (7) 给出的优化目标函数可变换为

$$f(t) = \min \left(\tilde{L}_t / \sum_{i=1}^n w_i \right), \quad (15)$$

其约束不等式仍为式 (8).

2.2 求取最优值

为了确保飞机电力系统为优先级较高的负载供

电, 切除优先级较低的负载, 假设一个调整负载控制开关的阈值参数 $\varepsilon \in \mathbf{R}$, 且 $0 < \varepsilon < 1$.

将式 (12) 转换为

$$\tilde{K}_i = \begin{cases} 0, & w_i < \varepsilon; \\ r_i w_i K_i, & w_i \geq \varepsilon; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

对 ε 进行调整, 通过求解式 (15) 即可将优先级较低的负载切除.

根据优化目标,调整 ε 的目的是为了在电力不足的情况下给尽可能多的负载供电. 由于 ε 与 P_{Δ} 的大小有关,本文选取 ε 的调整公式为

$$\Delta\varepsilon(n) = -\eta \frac{\partial P_{\Delta}(n)}{\partial \varepsilon(n)} + \alpha \Delta\varepsilon(n-1). \quad (17)$$

其中: η 是学习率, $\Delta\varepsilon(n)$ 是第 n 次迭代生成的权值调整量, $P_{\Delta}(n)$ 是第 n 次迭代的差值, $\varepsilon(n)$ 是 n 次迭代后 ε 的取值; $\alpha \Delta\varepsilon(n-1)$ 是动量项, $\Delta\varepsilon(n-1)$ 是第 $n-1$ 次迭代生成的权值调整量, α 是平滑系数,其取值为 $0 < \alpha < 1$.

将式(16)和(17)用于(15)的最优化计算过程,可以求出调整参数 ε 的取值,进而求得最优化值,完成飞机电力系统电力分配.

3 实验验证

本文构建了如图1所示的一个智能飞机配电实验系统. 其中电源包括:左发电机(LG),右发电机(RG),2个28V的直流蓄电池和变压整流器(TRU)等. 发电机LG和RG均由实验室电网模拟,其输出均为115V,50Hz.

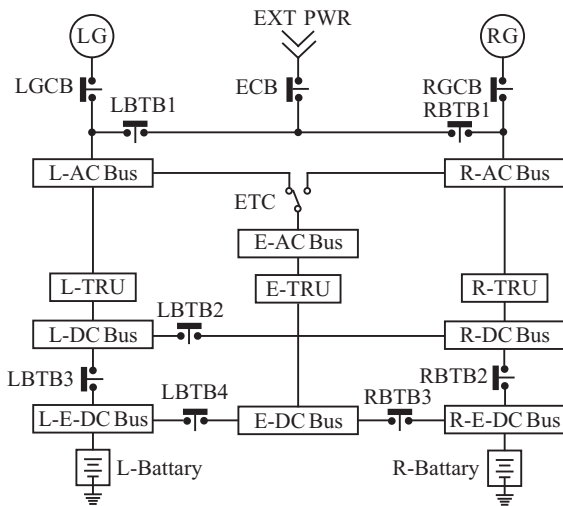


图1 配电实验系统中电源和汇流条的布局

图1所示配电实验系统中各个智能配电单元的网络拓扑如图2所示. 其中包括2个汇流条功率控制器(BPCU),4个电气负载管理中心(ELMC),2个一次配电单元(PPDU)和3个发电机控制器(GCU). 这些配电单元通过高速的数据总线连接在一起以实现数据交互. 由于负载数量较多,实验中一部分为物理负载,一部分采用了计算机模拟的数字负载,所有负载的功率都缩小为表1定义功率的1/30.

假设配电实验系统正常工作情况下,飞行阶段为巡航,LG和RG分别为左、右供电通道上的负载供电,左、右供电通道是隔离的. 实验时断开RG,造成系统电力不足. 其实验结果如下.

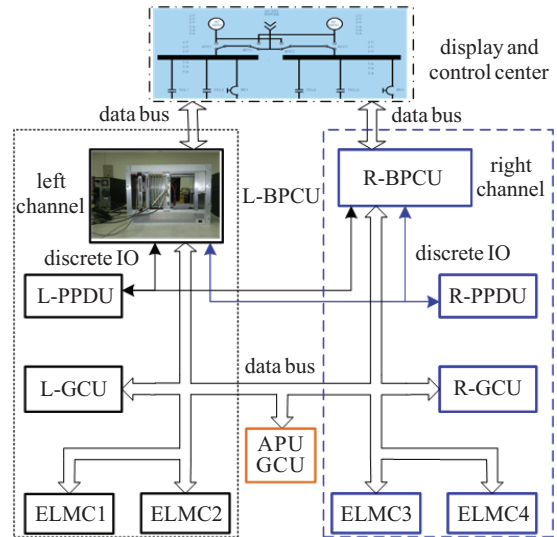


图2 智能配电单元网络拓扑

3.1 电力不足时参数的变化

刚断开RG时,由RG供电的大部分负载暂时失去电力. 配电实验系统需完成的工作是接通连接左、右供电汇流条的转换开关,然后进行电力分配. 该过程中的主要参数变化结果见表2.

表2 参数对比表

指标	正常供电	RG断电瞬间	电力不足
L_t / kW	5.80	2.89	2.87
P_t / kW	5.98	3.01	2.95
$\sum w_i$	4.6140	2.4233	3.6471
$\sum \tilde{K}_i$	163	80	79
ε	0	0	0.0093
$f(t)$	1.2570	1.1926	0.7869

从表2中可以看出,断开RG后,系统电力减少了1/2. 被供电负载的数量 $\sum \tilde{K}_i$ 也减少了约1/2. 通过采用本文提出的电力分配方法求解式(15)的最小值 $f(t)$,同时求得复合优先级因子之和 $\sum w_i$ 的最大值. $\sum w_i$ 的取值增大,而被供电负载的数量 $\sum \tilde{K}_i$ 基本不变,说明电力分配过程中接通了优先级较高的负载并切除了优先级较低的负载.

3.2 发电机和汇流条电流曲线

断开RG后,配电实验系统会对LG的电力进行分配,使用10A/1V的电流传感器测量LG和左边交流汇流条(L-AC bus)的电流,其结果见图3和图4.

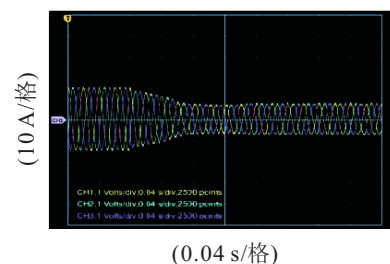


图3 RG故障时, L-AC bus的电流波形

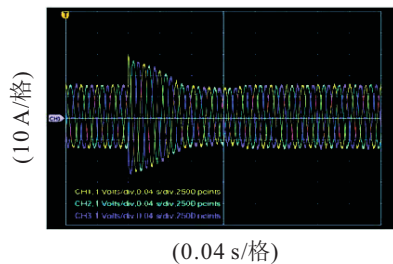


图 4 RG 故障时, LG 的输出电流波形

从图 3 可以看出, 断开 RG 后, 连接左、右主交流汇流条的转换开关接通, LG 为左、右两个通道供电, 左边供电通道切除了低优先级负载, 工作负载总功率为原来的 1/2。

从图 4 可以看出, 连接左、右主交流汇流条的转换开关刚接通时, 电网中会出现低优先级负载还没有退出工作, 而高优先级负载要求供电, 造成 LG 过载的情况。随着电力在左、右两个通道重新分配, LG 又恢复了正常供电, 其功率输出基本保持不变。

从图 3 和图 4 还可以看出, RG 断电后, 连接在 LG 上的负载是逐渐变化的, 没有在短时间瞬时完成切换。从而说明基于优先级的电力分配方法可以有效地抑制负载投切对供电质量的影响。

4 结 论

为了解决电力系统负载切除的随意性和盲目性, 本文通过向各个负载分配优先级的方法, 把优先级因子引入负载模型, 提出了一个可以保证该优先级负载或关键负载优先供电的优化目标函数。在求解优化问题时, 引入控制开关的阈值参数, 并把当前电力系统的可用供电容量作为阈值参数调整的重要指标。实验结果表明, 在飞机电力系统供电不足的情况下, 该方法可以快速准确地切除优先级较低的负载, 将电力分配给优先级较高的负载, 保持左、右供电通道的供电平衡, 有效抑制了负载切换对电气系统供电质量的影响。

参考文献(References)

[1] Rosero J A, Ortega J A, Aldabas E, et al. Moving towards a more electric aircraft[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, 22(3): 3-9.

- [2] Balaji Srimoolanathan. Aircraft electrical power systems-charged with opportunities[R]. San Antonio: Frost & Sullivan, 2008. <http://www.aerospace.frost.com>.
- [3] Verschoor M. The more electric architecture revolution[J]. Military Technology, 2005, 29(10): 60-65.
- [4] Guilfoyle D, Connolly E. Distributed SCADA systems for electricity distribution control[J]. Power Technology Int, 1994, 10(8): 169-172.
- [5] Concordia C, Fink L H, Poullikkas G. Load shedding and on an isolated system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1467-1472.
- [6] Momoh J A, Zhu J Z, Dolce J L. Optimal allocation with network limitation for autonomous space power system[J]. AIAA J of Propulsion and Power, 2000, 16(3): 1112-1117.
- [7] Momoh J A, Zhu J Z, Kaddah S S. Optimal load shedding study of naval-ship power system using the everett optimization technique[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 60(3): 145-152.
- [8] Firouzfard M, Abedini M, Moradi M H, et al. Optimal load shedding approach in distribution system for improved voltage stability and profile[J]. J of Basic and Applied Scientific Research, 2012, 2(2): 1933-1940.
- [9] Fernandes T S P, Lenzi J R, Mikilita M A. Load shedding strategies using optimal load flow with relaxation of restrictions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(2): 712-718.
- [10] Zhiping Ding, Dave A Cartes, Sanjeev K Srivastava. Expert system based dynamic load shedding scheme for shipboard power systems[C]. IEEE Industrial Application Society the 41st Annual Meeting. Tampa, 2006: 1338-1344.
- [11] Xiuxian Xia, Craig P Lawson. The development of a design methodology for dynamic power distribution management on a civil transport all electric aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 25(1): 125-131.
- [12] Mostafa M A, El-Hawary M E, Mbamalu G A N. Effects of prioritizing demand on optimal load shedding policy[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(7): 415-424.

(责任编辑: 李君玲)