

配网动态重构的静态解法

杨胡萍¹, 彭云焰¹, 熊宁²

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 提出一种解决配网动态重构问题的静态方法。该方法不仅求解简单, 而且能充分利用现有的静态方法来实现时变系统的动态重构。首先, 文章对静态重构的目标函数进行改进, 使其能够求解一个时间区间内的最优结构。然后在整个时间区间内用枚举法确定最优的重构时间, 完成区间内的一次动态重构。最后用逐次逼近法来调整各次重构的时间和结构, 实现区间内的多次优化。在修改过的 IEEE 33 节点上验证了所提方法的正确有效性。

关键词: 配电网; 动态重构; 时间枚举; 逐次逼近法

A static method for distribution network dynamic reconfiguration

YANG Hu-ping¹, PENG Yun-yan¹, XIONG Ning²

(1. Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A static method which can deal with distribution network dynamic reconfiguration is presented in this paper. The method not only can be realized easily, but also can make use of any established static method for solving dynamic reconfiguration. At first, objective function of static reconfiguration is amended for being applied in interval optimization. And then, time enumeration method is implemented for determining optimal reconfiguration time. Thus, once dynamic reconfiguration is finished. For realizing multi optimizations within specified time interval, gradual approaching method is employed for adjusting the time and frame of each reconfiguration. Correction and effectiveness of the proposed method is validated on modified IEEE 33-bus system at last.

Key words: distribution network; dynamic reconfiguration; time enumeration; gradual approaching method

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0053-05

0 引言

配电网重构主要分两类: 一是基于时间点的静态重构, 主要方法有支路交换法^[1,2]、最优流模式法^[3]、开关组法^[4]和一些人工智能搜索算法^[5-8]; 另一类是基于时间区间(通常为1天)的动态重构^[9-11], 即在负荷不断变换的一个时间区间内, 找出最佳的优化时间和对应的网络结构, 使整个时间区间内的运行费用最小。

静态配网重构是一个多约束, 大规模非线性组合优化问题。目前, 此类重构方法很多, 且大多都能较快地找到全局最优解。静态重构可以给出负荷恒定下的最优网络结构。然而, 实际配电系统上的负荷是动态地随时间变化的。为了更好地保证配电系统的安全、优质、经济运行, 常常需要依据负荷的变化对配网结构进行动态调整, 即需要进行动态重构。

目前, 动态重构的文章不多, 也没有好的解决办法。大多是通过近似、等效、折中的方法来处理,

无法保证得到全局最优解。文献[9]将整个时间序列内变化的负荷拉成1至几个恒定的水平段, 再用静态法进行重构, 优化的质量取决于负荷等效的效果。文献[10]为减小运算代价, 采用简化、折衷的策略对网络结构进行优化, 显然无法保证解的全局最优。文献[11]先求出各时间点下的较优结构, 然后以时间点作为阶段, 将各时间点下的较优结构作为状态, 用动态规划法求解。但某时间点下的较优结构未必是整个时间区间内的最优结构。

为解决配网动态重构难题, 本文提出一种基于逐次逼近的静态解法, 它能最大程度地利用现有的静态重构研究成果, 在计算量适度的情况下解决动态重构问题。该法首先对静态法的目标函数略加改变, 使其能够求解一个时间区间(本次重构时刻起~下次重构时刻止)内的最优结构。然后在整个时间区间内, 用枚举法确定该次重构的最佳时刻完成一次动态重构。为实现多次重构, 文章用逐次逼近法用来协调各次区间重构的优化时间和结构, 实现全局优化。

1 数学模型

通常,配网的动态重构是将开关的操作次数作为限制条件,通过某种寻优策略,使时间区间内的运行费用最小,具体数学模型见文献[11]。由于该模型未对重构次数进行约束,这将可能导致在一个时间区间内进行很多次重构。这对于自动化水平不高的配电网是不现实的,人工代价也是昂贵的。为了便于运行管理和更符合于实际的操作,本文将限定开关的操作次数改为限定重构的次数。这样不仅可根据实际情况的要求对重构次数进行限制,同时对开关的操作次数也进行了隐含的约束。基于指定重构次数的配网优化的本质就是在整个研究时间区间内,将有限的重构次数在最佳时刻、用最有效的方式(最经济的网络结构)进行分配,使整个区间内的运行费用(包括重构费用和网损费用)最小。

在一个研究周期内,将其采样离散化,每个采样点代表一个单位时间,通常为1小时。假设一个时间区间内指定的重构次数为 N ,则该时间区间可分为 N 个子区间。第 $i(i \in 1 \sim N)$ 个时间子区间内的网损由第 i 个时间子区间的长度和第 i 次重构后的网络结构决定。优化目标就是找出各次最佳的重构时间和网络结构,使整个区间内的运行费用最小。具体数学模型如下。

$$\min F = C_T \sum_{i=1}^N \sum_{j \in T_i} \sum_{k \in u_{i-1}} (I_{k,j}^2 \times R_k) + N \times C_R \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad N \leq N_{\max}$$

其中: F 为整个时间区间内的运行费用; N 是重构次数; N_{\max} 为规定的最大重构次数; u_{i-1} 是第 $i-1$ 次重构后的网络结构, $i=1$ 时对应着网络的初始结构; T_i 为第 i 个子时间区间,数值上等于第 i 次重构的时刻减去第 $i-1$ 次重构的时刻; j 为 t_i 子区间内时刻; k 为结构 u_{i-1} 中的支路; $I_{k,j}$ 为支路 k 在 j 时刻的电流; R_k 为支路 k 的电阻; $\sum_{k \in u_{i-1}} (I_{k,j}^2 \times R_k)$ 是第 j 个单位时

间点内,在网络结构 u_{i-1} 下产生的网损; $\sum_{j \in T_i} \sum_{k \in u_{i-1}} (I_{k,j}^2 \times R_k)$ 是第 T_i 个子区间内所有单位时间

产生的网损和; $\sum_{i=1}^N \sum_{j \in T_i} \sum_{k \in u_{i-1}} (I_{k,j}^2 \times R_k)$ 为研究周期内

所有单位时间的网损和。

同时, u_i 还应满足辐射连通性的约束。

2 基于静态法的区间重构

基于静态法区间重构就是在区间的初始时刻

进行重构,找出最佳的网络结构,使整个区间内的网损最小。求解数学模型为:

$$\min F_i = \sum_{j=t_0}^{t_1} \sum_{k \in u_0} I_{j,k}^2 \times R_k \quad (2)$$

其中: t_0 为区间的初始时刻; t_1 为区间的末时刻; j 为区间 $[t_0, t_1]$ 内的时刻; u_0 为初始时刻的网络结构; k 为 u_0 的支路; $I_{j,k}$ 为支路 k 在 j 时的电流; R_k 为支路 k 的电阻。

虽然此模型是最小化区间网损,但仍然是在初始时刻对网络初始结构 u_0 进行优化,所以本质上还属于静态重构。用任意一种静态法均可求解。

3 动态重构的时间枚举法

静态法区间重构只能在区间的初始时刻进行优化,但初始时刻未必就是最佳的优化时刻点。在此,本文用时间枚举法来确定最优的重构时间,完成一次动态重构。

时间枚举法就是在研究的时间区间内试探性地在每个时刻点进行一次静态区间重构,然后计算该时刻点下的区间网损 F_{int} 。假设重构时刻发生在 t_r 时,则区间网损为区间初始结构在区间初始时刻 t_0 到重构时刻 t_r 内产生的网损与重构后结构 u_r 在 t_r 到区间结束时刻 t_1 内产生的网损之和。比较每一个 F_{int} ,最小值对应的时刻即为最佳的优化时刻,在该点处重构的结构为最佳的网络结构。

$$\min F_{\text{int}} = \sum_{j=t_0}^{t_r} \sum_{k \in u_0} I_{j,k}^2 \times R_k + \sum_{l=t_r}^{t_1} \sum_{m \in u_r} I_{l,m}^2 \times R_m \quad (3)$$

其中: t_0 为区间的初始时刻; t_1 为区间的末时刻; t_r 为重构的时刻点; u_0 为初始时刻的网络结构; u_r 为重构后的网络结构。

4 逐次逼近法

采用时间枚举法可以确定一个时间区间内的最优重构时间及其网络结构,即进行一次动态重构。若要在该区间内进行多次重构,就要考虑各次重构之间时间、结构的相互配合,本文采用逐次逼近法解决。

逐次逼近法的求解分为两步,一是时间和结构初值的确定;二是最优时间和结构的逐次逼近。

4.1 时间和结构的初值确定

由于重构时间的插入,一个时间区间被分成了几个相邻的子区间。最佳的重构时间应安排在网损下降最多的子区间内。如果在该区间内通过重构下降的网损费用大于重构费用,则把此次重构的时间

和结构作为初值记录; 否则, 初值确定过程结束, 最佳的重构次数也随之确定。

确定初值的具体步骤为:

1) 参数设置: 设置初始时刻 $t_0=0$; 结束时刻为 $t_1=24$; 时间区间向量 $T_0=[t_0, t_1]$; 初始结构为 u_0 ; 重构次数 $i=0$; 最大重构次数为 N_{\max} ; 区间初始结构 $u_i=u_0$ 。

2) 判断 $i \leq N_{\max}$? 若是, 转 3); 否, 结束。

3) 从 t_0 时刻开始, 将 T_i 内相邻两个时刻构成一个区间, 根据已知条件依次确定每个子时间区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 的长度及其初始结构 u_i 。

4) 用时间枚举法对每个子区间进行重构, 得到每个子区间 $j(1 \leq j \leq i+1)$ 内的最佳重构时间 t_{jr} 、网络结构 u_{jr} 、区间最小网损 $F_{j,i+1}$ 及最新分割成的两个子区间网损 $F_{j,i+1}^1$ 和 $F_{j,i+1}^2$ 。

5) 求 $\Delta F = \max_{j \in T_i} \{F_{j,i}^1 - F_{j,i+1}\}$, 若 $C_T \Delta F < C_R$, 结束; 若否, 转 6)。

6) 找出 ΔF 对应的子区间 j^* , 将第 $i+1$ 次重构安排在此区间内, 同时令第 $i+1$ 次重构的时间 $t_{i+1}=t_{j^*r}$; 网络结构 $u_{i+1}=u_{j^*r}$; 并将区间网损 $F_{j^*,i+1}^1$ 和 $F_{j^*,i+1}^2$ 代替 $F_{j,i}$, 将 t_{i+1} 插入时间向量 T_i , 将 T_i 内的元素 t 按升序排列, 最后令 $i=i+1$, 转 3)。

4.2 最优时间和结构的逐次逼近

时间和结构的初值确定后, 通过逐次逼近法调整各次重构的时间和结构来寻找全局最优解。调整的策略是将两个相邻子区间合并作为一个大的子区间, 合并点也就是上次迭代中的一个重构点。在此大子区间内用时间枚举法进行重构, 得到一个新的重构时间和结构, 若此时间结构与上次迭代中的合并点完全一致, 调整结束; 否则用此新的值代替原值。然后将新的合并点作为起点, 对下一个大区间进行重构。反复迭代, 调整各次重构的时间和结构, 逐次逼近最优解。

假设初值确定后的时间向量为 T_i , 调整步骤为:

1) 令迭代次数为 $i=1$ 。

2) 令待调整的重构点 $j=1$ 。

3) 将 T_i 内的相间两元素 $[t_{j-1,i}, t_{j+1,i}]$ 作为一个大区间, 用时间枚举法求此区间内的最佳重构时刻 $t_{j,i+1}$ 和结构 $u_{j,i+1}$ 。

4) 若 $t_{j,i+1} = t_{j,i}$ 且 $u_{j,i+1} = u_{j,i}$, 结束; 否则, 令 $t_{j,i} = t_{j,i+1}$ 和 $u_{j,i} = u_{j,i+1}$, 转 5)。

5) 判断 t_{j+1} 是否等于结束时刻? 若是, $i=i+1$, 转 2); 若否, $j=j+1$, 转 3)。

5 算例

对于时变系统, 各节点负荷在不同时间的增长方式均不相同。本文假设待研究的系统有商业、居民和工业 3 种负荷, 各节点中各类负荷的分布不同, 但同种类型负荷的变化曲线相同。假设 k 表示节点号, i 表示负荷类型, j 表示时间点, $M_{i,k}$ 为节点 k 中第 i 类负荷的比例, $C_{i,j}$ 表示第 i 类负荷在 j 时的分量, $L_{k\max}$ 为节点 k 的负荷峰值, 则节点 k 在 j 时的

$$\text{负荷 } L_{k,j} = \sum_{i=1}^3 L_{k\max} M_{k,i} C_{i,j}。$$

5.1 算例数据

修改 IEEE33 系统^[12]作为动态重构的算例。时间区间为 1 天, 分 24 个时间点, $T_0=[0, 24]$; 电价为 0.6 元/kWh; 各节点的负荷峰值为文献数据的 120%, 具体见附录。

由于重构费用的计入会导致重构次数的减少, 为保证算例有一定的重构次数, 本文将重构费用暂定为 2 元。

5.2 计算结果

重构前, 该算例区间数为 1, 网损是 2 211.9°, 联络开关位置在 8-21、9-15、12-22、18-33 和 25-29。用 4.1 节方法确定最佳的重构次数和初值, 结果见表 1。其中, 所用的静态重构方法见文献[13]。

表 1 初值结果

Tab.1 The results of original values

i	j	t _i	T _i	u _i	F _i (度)				ΔF(度)	C _T ΔF(RMB)
					1	2	3	4		
0	-	-	[0 24]	8-21 9-15 12-22 18-33 25-29	2211.9	-	-	-	-	-
1	1	0	[0 0 24]	7-8 14-15 9-10 32-33 28-29	0	1526.2	-	-	685.7	411.42
2	2	16	[0 0 16 24]	7-8 14-15 9-10 32-33 25-29	0	815.1	707.7	-	3.4	2.04
3	3	21	[0 0 16 21 24]	7-8 14-15 9-10 32-33 28-29	0	815.1	641	65.8	9	0.54

其中: i 为重构次数, j 为网损下降最大的子区间, t_i 为重构的时刻, T_i 为由区间起始时刻、各次重构时刻和区间结束

时刻点组成的时间向量, u_i 为重构后的联络开关, F_i 为子区间的网损, ΔF 为最大的节约网损量, $C_T \Delta F$ 为可节约费用。

由表 1 可知, 进行第三次重构时只能带来 0.54 RMB 的网损收益, 但重构费用却达 2.0 RMB,

所以最佳的重构次数为 2, 时间向量 $T_2=[0 0 16 24]$ 。

从表 1 还可看出, 如果把重构费用设得大于

2.04 元, 则最佳的重构次数为 1 次, 最佳的重构时间在 0 时, 最佳的联络开关位置为 7-8, 14-15, 9-10, 32-33, 28-29, 经过 2 次迭代算法即可结束。

求得初值后, 用逐次逼近法调整各次重构的时间和结构, 求取全局最优解。将 T_2 中的 1、2 两子区间 [0 0] 与 [0 16] 合并, 得到大的子区间仍为 [0 16]。初始合并点在 0 时, 联络开关为 7-8, 14-15, 9-10, 32-33, 28-29。用时间枚举法求该大区间内新的最佳重构时间和结构。求得的重构结果与原重构点一致, 即在区间 [0 16] 内, 最佳的重构时刻仍在 0 时, 联络开关的位置也一致, 表明初始值就是全局最优解, 算法结束。

5.3 计算效率

由上述分析可知, 所提方法采用了 2 次时间枚举法、一次逐次逼近法(在时间区间 [0 16] 内寻找新的重构时间), 共花费静态重构次数=24+23+16=63 次; 若完全采用时间枚举法, 则需进行 $24 \times 23=552$ 次静态重构, 计算效率得到了有效提高。

6 结论

本文提出一种逐次逼近求解配电网动态重构的静态方法。它能有效地利用现有的静态方法, 实现时变系统的动态重构, 轻易地搜索到全局最优解。本文的主要工作为:

(1) 对静态法进行改造, 使其能确定基于时间区间的最佳网络结构。

(2) 利用时间枚举法确定基于时间区间的最佳重构时间。

(3) 提出了逐次逼近法, 不断调整各区间重构的时间和结构, 逼近全局最优解。

通过算例还可看出, 初值确定后, 逐次逼近法没有进一步减少算例的网损。文章随机地改变了 IEEE33 节点系统中各节点负荷的分布, 结果均无需对初值做进一步优化。这些现象反映了网络的最佳结构对一定范围内负荷的变化有较强的适应性。这个特性非常适合用本文所提方法求解。由于最佳的重构次数有限, 且不需要对初值进行多次调整, 从而大大减少了计算量, 用较少的计算代价获取了全局最优解, 较圆满地解决了时间区间内的配网动态优化难题。

参考文献

- [1] Civanlar S, Grainger J J, Yin Lee, et al. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3):1127-1223.
- [2] Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load

Balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1407.

- [3] 雷健生, 邓佑满, 张伯明. 综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 57-62.
LEI Jian-sheng, DENG You-man, ZHANG Bo-ming. Hybrid Flow Pattern and Its Application in Network Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1):57-62.
- [4] Kashem M A, Ganapathy V, Jasmon G B. A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks[A].In: Internet Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C]. London:2000.251-256.
- [5] Huang Y C. Enhanced Genetic Algorithm-based Fuzzy Multi-objective Approach to Distribution Network Reconfiguration[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2002, 149(5): 615-620.
- [6] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.
- [7] 陈根军. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.
CHEN Gen-jun. A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 28-33.
- [8] Hoyong Kim, Yunseok Ko, Kyung-Hee. Artificial Neural-network Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3):1356-1366.
- [9] 邓佑满, 张伯明, 田田. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 241-244.
DENG You-man, ZHANG Bo-ming, TIAN Tian. A Fictitious Load Algorithm and Its Application to Distribution Network Dynamic Optimizations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 241-244.
- [10] 尹丽燕, 于继来. 多时间段落的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 44-48.
YIN Li-yan, YU Ji-lai. Dynamic Reconfiguration of Distribution Network with Multi-time Periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 44-48.
- [11] 吴建中, 余贻鑫. 最小运行费用的时变重构全局优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 13-17.

WU Jian-zhong, YU Yi-xin. Global Optimization Algorithm to Time Varying Reconfiguration for Operation Cost Minimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 13-17.

[12] ZHU Ji-zhong, XIONG Xiao-fu, et al. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network[A]. In: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007.1-7.

[13] 张忠会, 李曼丽, 熊宁. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 继电器, 2007, 35(10):41-44.

ZHANG Zhong-hui, LI Man-li, XIONG Ning. An Improved Tabu Search for Reconfiguration of Distribution System[J]. Relay, 2007, 35(10)41-44.

附录:

附表 1 三种负荷在各节点中的比例

Tab.1 The proportion of three types load in each bus

k	M ₁	M ₂	M ₃	k	M ₁	M ₂	M ₃
2	0.2	0.5	0.3	18	0.4	0.5	0.1
3	0.5	0.3	0.2	19	0.5	0.2	0.3
4	0.5	0.2	0.3	20	0.7	0.3	0
5	0.6	0.1	0.3	21	0.5	0.3	0.2
6	0.4	0.4	0.2	22	0.3	0	0.7
7	0.6	0	0.4	23	0.5	0.4	0.1
8	0.3	0.3	0.4	24	0.4	0.5	0.1
9	0.4	0.6	0	25	0.6	0.4	0
10	0.3	0	0.7	26	0.7	0.3	0
11	0.6	0.2	0.2	27	0.1	0	0.9
12	0.5	0.5	0	28	0.6	0.3	0.1
13	0.6	0.4	0	29	0.4	0.1	0.5
14	0.4	0.4	0.2	30	0.7	0.2	0.1
15	0.5	0.1	0.4	31	0.4	0.4	0.2
16	0.2	0.7	0.1	32	0.2	0.1	0.7
17	0.3	0.3	0.4	33	0.3	0.7	0

其中, 下标 1、2、3 分别表示商业、居民和工业负荷。

附表 2 三种负荷的时间分布

Tab.2 The load distribution in hour of three types load

j	C ₁	C ₂	C ₃	j	C ₁	C ₂	C ₃
0	0.1	0.1	0.3	12	0.6	0.7	0.5
1	0.1	0.1	0.3	13	0.7	0.6	0.6
2	0	0.1	0.4	14	0.8	0.5	0.8
3	0	0.1	0.2	15	1	0.6	0.8
4	0	0.4	0.2	16	1	0.7	0.7
5	0	0.3	0.3	17	0.8	0.8	0.7
6	0.1	0.4	0.3	18	0.6	0.9	0.8
7	0.2	0.4	0.4	19	0.7	1	0.9
8	0.7	0.3	0.8	20	0.6	1	1
9	0.8	0.3	1	21	0.2	0.6	0.8
10	0.8	0.5	0.9	22	0.1	0.5	0.5
11	0.7	0.6	0.9	23	0.1	0.2	0.4

附表 3 33 节点配电系统的参数和各节点负荷

Tab.3 The load and network data of IEEE33-bus system

首节点	末节点	支路电阻 /Ω	支路电抗 /Ω	末节点注入功率	
				有功/MW	无功/Mvar
1	2	0.0992	0.0470	0.1	0.06
2	3	0.4930	0.2511	0.09	0.04
3	4	0.3660	0.1864	0.12	0.08
4	5	0.3811	0.1941	0.06	0.03
5	6	0.8190	0.7070	0.06	0.02
6	7	0.1972	0.6188	0.2	0.1
7	8	0.7114	0.2351	0.2	0.1
8	9	0.0300	0.7400	0.06	0.02
9	10	1.0440	0.7400	0.06	0.02
10	11	0.1966	0.0650	0.045	0.03
11	12	0.3744	0.1238	0.06	0.035
12	13	1.4680	1.1550	0.06	0.035
13	14	0.5416	0.7129	0.12	0.08
14	15	0.5910	0.5260	0.06	0.01
15	16	0.7463	0.5450	0.06	0.02
16	17	1.2850	1.7210	0.06	0.02
17	18	0.7320	0.5740	0.09	0.04
2	19	0.1640	0.1565	0.09	0.04
19	20	1.5042	1.3554	0.09	0.04
20	21	0.4095	0.4784	0.09	0.04
21	22	0.7089	0.9373	0.09	0.04
3	23	0.4512	0.3080	0.09	0.05
23	24	0.8980	0.7091	0.42	0.2
24	25	0.8960	0.7011	0.42	0.2
6	26	0.2030	0.1034	0.06	0.025
26	27	0.2842	0.1447	0.06	0.025
27	28	1.0590	0.9337	0.06	0.02
28	29	0.8042	0.7006	0.12	0.07
29	30	0.5075	0.2585	0.2	0.6
30	31	0.9744	0.9630	0.15	0.07
31	32	0.3105	0.3619	0.21	0.1
32	33	0.3510	0.5320	0.06	0.04
8	21	2.0000	2.0000	-	-
9	15	2.0000	2.0000	-	-
12	22	2.0000	2.0000	-	-
18	33	0.5000	0.5000	-	-
25	29	0.5000	0.5000	-	-

收稿日期: 2008-05-16; 修回日期: 2008-08-19

作者简介:

杨胡萍 (1964-), 女, 研究生导师, 研究方向是电网可靠性; E-mail: yhping123@163.com

彭云焰 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向是电力系统规划与可靠性;

熊宁 (1975-), 男, 博士研究生, 研究方向是电压稳定与配电网优化重构。