

兼顾供电可靠性和经济性的多目标网络重构

王守相¹, 张鹏²

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 不列颠哥伦比亚大学, 加拿大)

摘要: 提出了基于隐含并行寻优思想的兼顾供电可靠性提高和网损降低的配电系统多目标网络重构算法。该算法采用了大规模配电系统三相潮流计算和可靠性评估方法, 实现了配电系统可靠性与经济性水平的综合最优化。该算法具有不依赖于网络开关的初始状态, 也不受初始联络开关的操作次序的影响, 可以高效地求解系统的有效解, 实现多目标综合优化的特点。算例结果表明, 该算法是灵活和高效的。

关键词: 配电系统; 网络重构; 可靠性; 经济性

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)07-0016-05

0 引言

为了提高配电系统可靠性而进行的工程方案和措施的岁收需量法经济评估^[1]表明, 如果某个方案使得资金成本尽可能小甚至不新增投资, 同时可以提高可靠性, 降低网损, 则该方案无疑是期望的理想方案之一。配电网络重构即是一种费用小, 不需增加投资, 通过发挥配电网自身潜力而提高系统的可靠性和经济性的方法。

配电网络重构是在满足系统约束条件下, 通过切换联络开关和分段开关的开/合状态来寻求一种符合某特定运行要求的拓扑结构。目前文献中配电网络重构多以降低网损为主要目标。事实上, 电力系统中配电系统与用户的联系最为紧密, 对用户的供电可靠性和供电质量的影响也最直接。好的配电网络重构方法不仅要能够为电力公司节省大量的网损费用, 而且要能够提高用户的供电满意度, 减少用户的停电损失。在竞争性市场机制逐渐引入电力工业的今天, 配电系统可靠性格外受到重视, 因此配电网络重构中以提高配电系统可靠性为目标函数之一是合理和必要的。

网络重构既可作为故障恢复时的附加优化手段使用^[2], 也可作为运行时提高配电系统可靠性水平和降损的优化手段来应用。文献[3]提出了一种通过网络优化重构来提高配电系统可靠性的概念, 将Tabu搜索算法应用于网络重构的寻优。但是, 为使网络重构作为运行时的优化手段, 在配电系统中得到实用化应用, 要求重构方法应能考虑多个目标函数, 应进行三相不平衡精确潮流分析, 能处理大规模配电系统, 且计算较为快速。为此, 本文基于隐含并行思想^[4], 提出并实现了可以提高供电可靠性的大

规模配电网络多目标重构算法。

1 提高可靠性的大规模配电网络多目标重构算法

1.1 数学模型

常用的配电系统可靠性指标有系统平均停电频率(SAIFI), 系统平均停电持续时间(SAIDI), 用户平均停电持续时间(CAIDI), 平均供电可用率(ASA), 系统电量不足期望值(ENS)等, 加上系统有功功率损耗, 可供选择的目标函数有多种组合^[5]。各电力企业所追求的目的不同, 因而会在不同的目标函数之间作出选择。

在考虑多目标重构时, 本文采用目标归一化方法求解有效解, 即对多个目标函数进行加权建立妥协模型^[6], 把多目标优化转化为单目标优化。例如下列目标函数:

1) 综合考虑总期望电量不足ENS和降低系统网损

为同时考虑网损和ENS, 将ENS乘以平均电价折算倍数b和电价d, 转换为停电损失费用; 将典型方式下(峰值负荷状态)的有功损耗 P_{loss} 乘以年最大损耗小时数^[7]和电价d, 近似转化为网损费用。将停电损失费用和网损费用两个经济指标加权, 构造综合目标函数, 则网络重构的目标转化为:

$$\min w_1 \left(\sum_{i=1}^m U_i P_a \right) bd + w_2 P_{loss} d \quad (1)$$

其中: m为系统的负荷点总数, U_i 为年平均停运时间, P_a 为接入负荷点i的平均负荷, w_1 、 w_2 为权重系数, $w_1 + w_2 = 1$ 。

2) 综合考虑降低系统平均停电频率SAIFI和系统平均停电持续时间SAIDI

文献中一种常见停电损失模型^[8]为:停电损失 = a ×期望停供电力 + b ×期望停供电量,其中 a 、 b 分别为每停供 1 kW 电力和 1 kWh 电量的费用。停供电力和 $SAIFI$ 相关,停供电量和 $SAIDI$ 相关,因此可将 $SAIFI$ 和 $SAIDI$ 两个指标加权构造综合目标函数,其意义是隐含表示系统的停电损失费用,此时网络重构的目标为:

$$\min w_1 \frac{\sum_{i=1}^m iN_i}{\sum_{i=1}^n N_i} + w_2 \frac{\sum_{i=1}^m U_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (2)$$

其中: i 为负荷点 i 的平均故障率。

3) 提高系统供电可用率 $ASA I$ 或降低系统供电不可用率 $ASUI$

$$\max ASA I = \frac{\sum_{i=1}^m 8760N_i - \sum_{i=1}^m U_i N_i}{\sum_{i=1}^m 8760N_i} \quad (3)$$

或

$$\min ASUI = \frac{\sum_{i=1}^m U_i N_i}{\sum_{i=1}^m 8760N_i} \quad (4)$$

同时网络重构必须满足下列约束条件:

1) 网络拓扑约束

$$g_k \in G \quad (5)$$

其中: g_k 为重构后网络结构, G 为所有可行的辐射型网络结构的集合。

2) 负荷约束

$$S_{k-1} = S_k + S_{Lk} \quad (6)$$

其中: S_{k-1} 、 S_k 分别为母线 $k-1$ 和 k 的注入复功率, S_{Lk} 为母线 k 的复功率负荷。

3) 运行约束,包括母线电压约束和支路过载约束

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (7)$$

$$I_k \leq I_k^{\max} \quad (8)$$

其中: V_k^{\min} 、 V_k^{\max} 分别为母线 k 的电压幅值 V_k 的下限和上限值, I_k^{\max} 为支路 k 电流 I_k 的容许过载限值。

1.2 网络重构过程中的系统可靠性计算

在配电网多目标重构过程中,闭合一个联络开关后必须打开一个分段开关以保持系统的辐射型结构,这样的一个联络开关和分段开关的组合,称为一个开关交换。对于每次开关交换后的系统,需要重新计算系统可靠性指标。此时,需要对可靠性计

算中的数据结构进行一定修正。

闭合一个联络开关后将形成一个网孔。假定网孔中从待打开开关(所在的支路为 P_1)到待闭合开关(所在的支路为 P_2)之间的路径上所有支路的集合为 P ,不属于集合 P 但与集合 P 中支路直接相连的支路的集合为 A 。开关交换后可靠性计算的树存储结构的一般修正步骤如下(如图 1所示)。

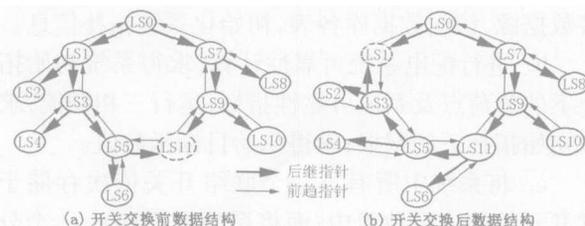


图 1 开关交换后可靠性计算的树结构的变化

Fig 1 Data structures of reliability calculation for the switch exchange

1) 对于集合 P 中的任两条支路,改变其前趋后继关系,原前趋改为后继,而原后继改为前趋。

2) 对于 $P_1 \in P, A_1 \in A$,且有后继指针 $P_1 \rightarrow A_1$,则将其修改为 $P_2 \rightarrow A_1$,使得 A_1 成为 P_2 的后继结点。

3) 对于 $P_1 \in P, A_1 \in A$,且有前趋指针 $A_1 \rightarrow P_1$,则将其修改为 $A_1 \rightarrow P_2$,使得 P_2 成为 A_1 的前趋结点。

4) 对于以 A 中元素为根结点的子树,其所有结点的存储结构皆不需要修改。

经过上述数据结构的修正之后,就可以进行配点系统可靠性计算,用以求取开关交换之后系统各项可靠性指标的变化。

值得注意的是,对于一个经过开关交换后的树结构,对其实施步骤 1~4,即可恢复到开关交换前的状态。在重构过程中,若选择某一开关交换之后目标函数没有下降,则需要恢复交换前的数据结构,因此只需调用上述步骤 1~4即可实现拓扑结构的恢复。

1.3 隐含并行思想

隐含并行算法^[4]的思想是隐含并行地在各个系统基本邻域结构内进行寻优搜索,且每重新开始一次网络寻优遍历都将产生较大的网络结构摄动,从上一步网络遍历的局部最优结构中跳出。经过两到三次遍历即可获得全局最优或近全局最优结构。算法的优点在于不依赖于各种与网损估计有关的启发式规则。

本文基于隐含并行寻优思想,实现了以提高系统可靠性为目标之一的配电网多目标重构算法,算法不依赖于网络开关的初始状态,也不受初始联

络开关的操作次序的影响,可以高效地求解系统的有效解(当考虑单目标时可求得全局或近全局最优解),达到多目标的综合优化。

1.4 计算步骤

以提高系统可靠性为目标之一的配电网重构算法的步骤如下。

a 用户选择目标函数的组合及设定权系数;连接数据源,访问数据库各表,初始化系统拓扑信息。

b 进行配电系统可靠性计算,求得系统初始拓扑下的负荷点及系统可靠性指标;运行三相潮流,求得初始拓扑下的网损;求得初始目标函数值。

c 将系统中所有 n_{open} 个联络开关依次存储于常开开关的记录数组中;而将系统中所有 $n_{\text{cb, sed}}$ 个分段开关依次存储于常闭开关的记录数组中。

d 开始第 1 次网络寻优遍历。

首先,按在常开开关的记录数组中的顺序一次闭合一个联络开关 $t_i, i = 1, 2, \dots, n_{\text{open}}$;然后,在闭合联络开关 t_i 形成的环路上,假想逐一打开环路上的 s_i 个常闭开关,相应进行修改网络拓扑、计算可靠性指标和网损、计算目标函数值、恢复网络拓扑的操作,选择打开后使系统当前目标函数值最小的那个常闭开关并将其打开;最后,将已打开的分段开关作为新的常开开关,存储于联络开关 t_i 在常开开关的记录数组中的相应位置,而闭合后的联络开关 t_i 作为新的常闭开关,存储于已打开的分段开关原在常闭开关的记录数组中的位置。

e 如果 $i < n_{\text{open}}, i \leftarrow i + 1$, 转步骤 d; 否则,完成第 1 次网络寻优遍历。继续下一步。

f 开始第 2 次网络寻优遍历。

g 如果 $i < n_{\text{open}}, i \leftarrow i + 1$, 转步骤 f; 否则,完成第 2 次网络寻优遍历。继续下一步。

h 开始第 3 次网络寻优遍历。完成后,结束。

2 算例分析

本文应用上述算法采用 Visual C++ 开发了以提高系统可靠性为目标之一的配电网重构程序,程序采用 ADO 技术进行数据库编程。用户可灵活选择不同目标函数,对大规模三相不平衡配电系统进行网络重构。

采用基本算例为文献 [9] 引入的 69 母线系统。该系统是 PG&E 12.66 kV 配电系统的一部分,包含 5 个联络开关,74 条线路,每条线路上都接有分段开关。系统元件可靠性参数见文献 [4]。

本文给出了不同目标函数组合下的 69 母线系统重构结果,可靠性计算条件为考虑负荷转移以及变压器的故障替换。

2.1 以降低 ENS 和网损为目标的网络重构

此时目标函数为式 (1) 形式。取停电损失的电价折算倍数为 25 倍,年最大负荷损耗时间为 3 200 h,电价为 0.3 元。为进行比较研究,分别对 w_1, w_2 不同的取值情况进行计算, w_1, w_2 分别为停电损失费用和网损费用的权重系数。表 1 列出了 w_1, w_2 五

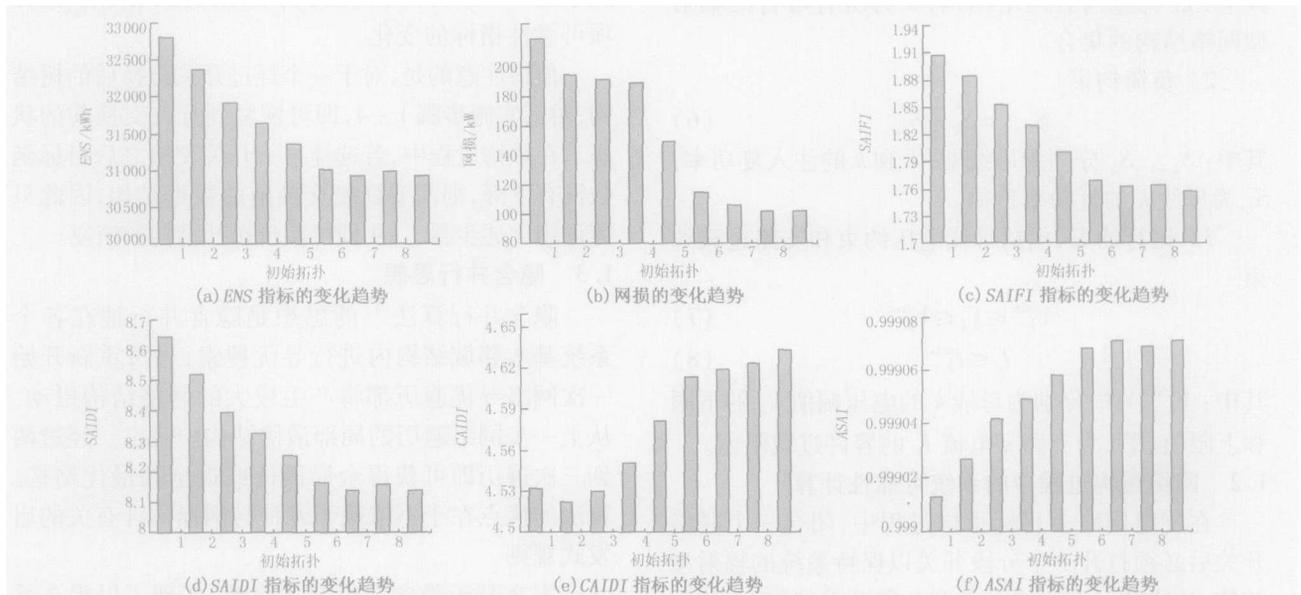


图 2 重构过程中可靠指标和网损的变化趋势 ($w_1 = w_2 = 0.5$)

Fig 2 Reliability indices and real power loss during network reconfiguration when $w_1 = w_2 = 0.5$

种不同取值情况下的重构结果。

以 $(w_1 = 0.5, w_2 = 0.5)$ 为例,隐含并行算法重构寻优的过程中共进行了 6 次开关操作选择,最终确定开关操作为 72 - 14, 73 - 62, 74 - 59。其中开关操作 $i - j$ 是指闭合编号为 i 的开关,打开编号为 j 的开关(开关编号见 [8])。图 2 示出了 $(w_1 = 0.5, w_2 = 0.5)$ 时重构过程中可靠指标和网损的变化趋势图,图 3 为重构前后系统电压轮廓。图 4 给出了 $(w_1 = 1, w_2 = 0)$ 时重构过程中 ENS 和网损的变化趋势。

由上述重构结果看出:

1) 以降低 ENS 为目标的网络重构,可以明显提高系统可靠性水平。如 $(w_1 = 1, w_2 = 0)$ 时, $SAIFI$

下降 8.2%, $SAIDI$ 下降 6.5%, ENS 下降 6.2%, ASA 提高了 $6.4E-5$ 。

2) 当改变 (w_1, w_2) 的不同取值时,可以得到具有不同特性的有效解。运行人员可以根据系统实际情况进行选择。增大 w_1 ,有效解更偏重可靠性水平的提高;增大 w_2 ,有效解更偏重降低网损。

3) 比较本例中 $(w_1 = 1, w_2 = 0)$, $(w_1 = 0, w_2 = 1)$, $(w_1 = 0.5, w_2 = 0.5)$ 三种情况,可见综合考虑降低 ENS 和降低网损的多目标重构一般不能使每一个单目标函数取得最优化,即重构结果一般不能使得 ENS 和网损同时达到最小,但却取得了可靠性水平提高和网损下降的综合效益。

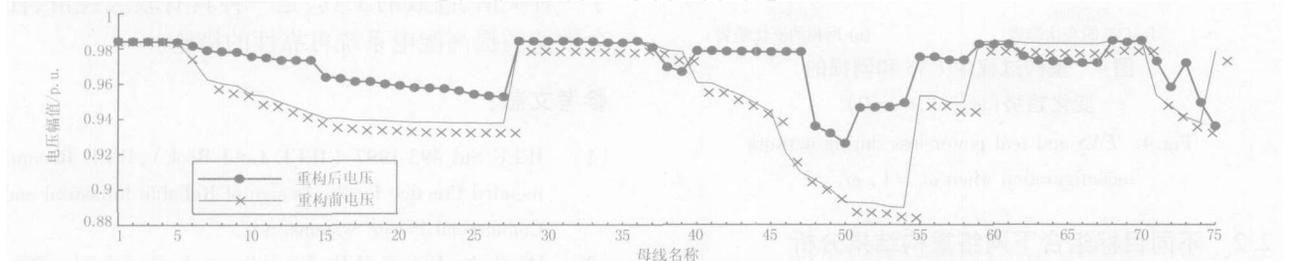


图 3 重构前后系统电压质量对比 $(w_1 = w_2 = 0.5)$

Fig 3 Voltage profile pre/post network reconfiguration when $w_1 = w_2 = 0.5$

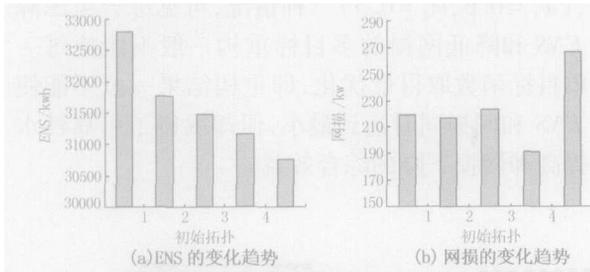
表 1 69 母线系统以降低 ENS 和网损为目标函数的重构结果比较

Tab 1 Reliability indices, real power loss and voltage profile pre/post reconfiguration

69 母线系统	开关操作选择 (次序上 → 下, 左 → 右)		最后的开 关操作	ENS /kWh	有功网损 /kW	最小电压点	
重构前				32805.50	225.05	0.890 在母线 54	
重 构	$w_1 = 0, w_2 = 1$	70 - 10	74 - 59	72 - 15 73 - 62 74 - 59	30994.06	102.34	0.931 在母线 50
		71 - 18	10 - 70				
		72 - 13	18 - 71				
		73 - 62	13 - 15				
后	$w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$	70 - 10	74 - 59	72 - 15 73 - 62 74 - 59	30994.06	102.34	0.931 在母线 50
		71 - 18	10 - 70				
		72 - 13	18 - 71				
		73 - 62	13 - 15				
后	$w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$	70 - 10	73 - 62	72 - 14 73 - 62 74 - 59	30919.29	102.58	0.930 在母线 50
		71 - 14	74 - 59				
		72 - 71	10 - 70				
后	$w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$		71 - 15	71 - 15 72 - 45 73 - 63 74 - 48	30763.11	266.73	0.880 在母线 36
			72 - 45				
			73 - 63				
			74 - 48				
后	$w_1 = 1, w_2 = 0$		71 - 15	71 - 15 72 - 45 73 - 63 74 - 48	30763.11	266.73	0.880 在母线 36
			72 - 45				
			73 - 63				
			74 - 48				

表 1 (续)

69母线系统	SAIFI	SADI	CADI	ASAI	ASUI	AENS
重构前	1.907 72	8.646 731	4.602 495	0.999 013	0.000 987	34.459 564
$w_1=0, w_2=1$	1.764 72	8.159 832	4.623 868	0.999 069	0.000 931	32.556 787
重 $w_1=0.2, w_2=0.8$	1.764 72	8.159 832	4.623 868	0.999 069	0.000 931	32.556 787
构 $w_1=0.5, w_2=0.5$	1.756 92	8.140 086	4.633 158	0.999 071	0.000 929	32.478 250
后 $w_1=0.8, w_2=0.2$	1.751 72	8.088 168	4.617 273	0.999 077	0.000 923	32.314 193
$w_1=1, w_2=0$	1.751 72	8.088 168	4.617 273	0.999 077	0.000 923	32.314 193

图 4 重构过程中 ENS 和网损的变化趋势 ($w_1=1, w_2=0$)Fig 4 ENS and real power loss during network reconfiguration when $w_1=1, w_2=0$

2.2 不同目标组合下网络重构结果分析

选择各种不同目标函数进行网络重构,获得了丰富的数值结果,得出了下述有益的结论:

1) 对以降低 SAIFI 和 SADI 为目标的重构,在隐含并行寻优过程中,SAIFI 和 SADI 具有相同的变化趋势;而 SAIFI 下降速度高于 SADI 下降速度。可以证明,以降低 ENS 和网损为目标的重构和以降低 SAIFI 和 SADI 为目标的重构中,CADI 不降反而略有上升。

2) 对以提高供电可用率 ASAI 为目标的重构,可以证明,SAIFI 和 SADI 适当加权进行寻优的结果和对 ASAI 寻优的结果是接近甚至相同的。

3) 对以降低用户平均停电持续时间 CADI 为目标的重构,可以证明,以 CADI 最小为目标的网络重构对各可靠性指标提高效果最不明显。

3 结论

以单个指标为目标函数固然对提高此目标会取得好的效果,但可能是以牺牲另一目标为前提。可靠性相关的目标函数与网损目标函数应综合考虑,忽视任何一个目标都可能是不合理的。

提高系统可靠性的重构过程中,以 CADI 指标作为目标函数寻优,重构结果对提高可靠性指标和网损指标不甚明显,有时甚至使指标变坏。因此不推荐以此指标作为重构目标。这也表明 CADI 的提

高有赖于系统本身设备的可靠性水平及调度运行水平的切实提高,仅靠重构难以有质的提高。

基于隐含并行寻优思想,提出的以提高系统可靠性为目标之一的配电网多目标重构新算法为实现配电网可靠性与经济性水平的综合最优化提供了一种灵活、高效的工具,是一种具有较大经济、社会效益的提高配电网可靠性的措施。

参考文献:

- [1] IEEE Std 493-1997 (IEEE Gold Book), IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems[S].
- [2] Miu KN, Chiang HD, Yuan B, et al. Fast Service Restoration for Large-scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 789-795.
- [3] 王秀丽,吴宏晓,别朝红,等. 以提高系统可靠性为目标的配电网重构[J]. 中国电力, 2001, 34(9): 40-43.
WANG Xiu-li, WU Hong-xiao, BIE Zhao-hong, et al. Distribution System Reliability and Network Reconfiguration[J]. Electric Power, 2001, 34(9): 40-43.
- [4] 王守相,王成山. 一种隐含并行的大规模三相不平衡配电网重构新算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(19): 34-38.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. A Novel Network Reconfiguration Algorithm Implicitly Including Parallel Searching for Large-scale Unbalanced Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(19): 34-38.
- [5] 张鹏. 区间分析在电力系统可靠性评估中的应用研究(博士学位论文)[D]. 北京:清华大学, 2002.
ZHANG Peng. A Study on Interval Analysis Applied to Power System Reliability Evaluation, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [6] Rardin R L. Optimization in Operations Research[M]. Prentice Hall, 1998.

(下转第 54 页 continued on page 54)

参考文献:

- [1] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势 [J]. 电网技术, 2001, 25(12): 1-10
XN Yao-zhong Development Trend of Power System Dispatching Automation Technique in 21st Century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10.
- [2] Draft IEC61970 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API), Part301: Common Information Model (CM) Draft 6[S].
- [3] 王瑞金, 段会川, Gogolla M. 统一建模语言 UML 及其建模实例 [J]. 计算机应用研究, 2002, (8): 80-84
WANG Rui-jin, DUAN Hui-chuan, Gogolla M. Unified Modeling Language and Its Application for Modeling[J]. Application Research of Computers, 2002, (8): 80-84.
- [4] DONG Xu-zhu, LU Yi-lu, Lopinto F A, et al Information Model for Power Equipment Diagnosis and Maintenance[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002 27-31.
- [5] IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus, Part I Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors[S].
- [6] 潘毅, 周京阳, 李强, 等. 基于公共信息模型的电力系统模型的拆分与合并 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 45-47.
PAN Yi, ZHOU Jing-yang, LI Qiang, et al The Separation Combination of Power System Model Based on CM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 45-47.

收稿日期: 2004-07-12; 修回日期: 2004-09-06

作者简介:

黄蕾 (1981 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为计算机在电力系统及电力市场中的应用; E-mail: alarry8@163.com
王康元 (1973 -), 男, 工程师, 研究方向为电力企业信息整合及电力系统自动化;
梁继勇 (1970 -), 男, 工程师, 研究方向为电力生产管理信息化。

Power equipment diagnosis and management system model based on CM

HUANG Lei¹, WANG Kang-yuan¹, LANG Ji-yong²

(1. Electrical Engineering School, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2 Ningbo Power Bureau, Ningbo 315000, China)

Abstract: The IEC61968 series standard has established the basic model of power system equipments. According to the need of diagnosing and managing equipments in China, the paper models the aspects of equipment including assets, measurement, work and document. Based on the excellence of this model, the paper advances a concept of building a foundation in power system for common information sharing and storing.

Key words: common information model; equipment diagnosis; management; OOM

(上接第 20 页 continued from page 20)

- [7] 韩祯祥. 电力系统分析 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993.
HAN Zhen-xiang Power System Analysis [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1993.
- [8] Lakervi E, Holmes E J. Electricity Distribution Network Design [J]. IEE Power Engineering Series, 1996.
- [9] Baran M E, Wu F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power

Delivery, 1989, 4(1): 725-734.

收稿日期: 2004-07-22; 修回日期: 2004-11-11

作者简介:

王守相 (1973 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全性与可靠性评估、配电系统自动化; E-mail: wangshouxiang@tsinghua.org.cn
张鹏 (1975 -), 男, 博士, 研究方向为电力系统实时仿真、稳定与控制、可靠性工程。

Multi-objective network reconfiguration considering reliability in provement and economy

WANG Shou-xiang¹, ZHANG Peng²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2 University of British Columbia, Canada)

Abstract: Multi-objective network reconfiguration algorithm for distribution system reliability improvement is advanced based on implicit parallel search method, reliability assessment algorithm and three-phase unbalanced power flow. The result of reconfiguration is independent of the initial topology and the switch operation order either. The comprehensive optimization solution is obtained effectively, and global or nearly global optimum can be obtained considering single subject. The implemented software according to this method provides a powerful, flexible and easy-to-use tool for distribution system planning, field engineering and operations.

Key words: distribution system; network reconfiguration; reliability; economy of energy