

水火混合电力系统发输电设备联合检修计划优化模型 及其算法实用研究

颜伟¹, 温元喜¹, 张蓓²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 四川省电力公司调度中心, 四川 成都 610041)

摘要: 建立的发输电检修计划模型, 以节能调度为原则, 目标函数为检修费用、发电能耗费用以及购电费用之和最小。特别考虑了水火电协调、水电发电量约束、水库调节能力、梯级水电约束、关键线路传输稳定限额、机群最小开机等实用约束条件。在遗传算法框架内, 将原优化问题分解为离散变量的检修子问题和连续变量的发电运行子问题。对检修子问题, 结合问题的特点设计编码方式和遗传算子。并采用了一种快速的启发式方法求解运行子问题。通过个体适合度的评估对两个子问题进行协调。实际系统算例表明所提出的模型和算法的可行性。

关键词: 发输电设备; 检修计划; 发电计划; 遗传算法; 水火电协调

Research on practical model and algorithm of generation and transmission maintenance scheduling in hydro-thermal power system

YAN Wei¹, WEN Yuan-xi¹, ZHANG Bei²

(1.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2.Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract: A practical model of generation and transmission maintenance scheduling is established. The objective is to minimize total maintenance costs, production costs and payments for power energy purchase. The constraint set includes particularly practical constraints, such as hydro-thermal coordination, hydro generating energy limitation, adjustment ability of reservoirs, cascade reservoirs, tie lines capacity limits, and least on-running units of cluster. In genetic algorithm structure, the primal problem is decomposed into a discrete maintenance sub-problem and a continuous operation sub-problem. To solve maintenance sub-problem, we design a coding method and genetic operator based on the feature of the problem. Consequently, an efficient heuristic method is developed to deal with operation sub-problem. Two sub-problems are coordinated through the evaluation of individual fitness. A calculation example of realistic system demonstrates the proposed model and algorithm are feasible.

Key words: generation and transmission facilities; maintenance scheduling; generation scheduling; genetic algorithm; hydro-thermal coordination

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0071-05

0 引言

电力系统发输电设备检修计划是电力系统规划与运行的重要组成部分, 设备的检修停运会对系统的可靠性和经济性产生重要影响^[1]。随着电网的不断扩大和电力市场化的发展, 制定合理的发输电设备检修计划已成为一个急需解决的问题^[2]。

传统的发输电检修计划将机组和线路检修分开制定。其中发电机组检修计划优化模型以可靠性^[3,4]或经济性^[5,6]为目标函数, 发电机组检修计划的约束条件通常包括检修时间约束、检修资源约束,

燃料以及排放等约束^[7]。传统的输电检修以可靠性为目标^[8], 随着电力市场的发展, 对输电检修的经济性越来越关注^[9]。

随着电力市场的发展, 协调制定电力系统发输电设备联合检修计划成为了近期的研究热点^[2,7,10,11]。然而对于较大的电力系统其输电线路数量很大, 因此, 有必要筛选出需要和机组联合检修的线路。检修计划的经济性受到了更多的关注, 文献^[2,10]将负荷分层处理, 分别使用线性化最优潮流求解发电运行子问题。然而负荷分层数的取舍必须谨慎考虑计算时间和精度的平衡。此外对于水火混

合电力系统, 由于存在水电可发电量耦合约束, 将极大增加最优潮流计算难度。为此, 本文采用最大负荷和电量需求相结合的负荷模型, 无需对负荷进行分层处理, 只需保持电力电量分别平衡。近年来, 《节能发电调度办法(试行)》在我国部分省份试点。然而现有研究没有充分考虑发输电检修和节能调度的关系, 对充分利用可再生能源重视不够。四川电网作为全国电网系统中节能调度的五个试点单位之一, 具有水电比重大的特点。水电的利用原则是以水定电, 其检修要求在枯水期进行, 尽量不安排丰水期检修, 以达到不弃水或尽量少弃水的目的。此外, 由于水电发电受来水量的影响, 如何综合考虑水库的水位消落, 梯级水电的协调检修, 实现最大限度地利用水能资源成为当前急需解决的课题。

电力系统检修计划为一大规模混合整数规划问题。已有许多方法用于求解检修计划问题, 这些方法可以分为启发式优化方法和数学优化方法^[1]。由于现代智能优化算法在组合最优化问题中全局寻优能力的突出表现, 其也被引入到检修计划问题的求解中^[12-14]。

本文以四川电网发输电设备联合检修计划作为研究对象。以节能调度要求为背景, 结合实际系统的特点, 建立了实用化的发输电联合检修计划模型。模型的目标函数为检修费用、发电能耗以及购电费用之和最小。约束条件除考虑了常规的检修约束、可靠性约束外, 还着重考虑了大量实际运行约束条件。例如水电可发电量约束, 水库调节能力约束, 梯级水电约束, 关键线路传输稳定限额、机群最小开机约束等实用约束条件。针对该模型采用遗传算法进行求解。将原优化问题分解为离散变量的检修子问题和连续变量的发电运行子问题。对离散的检修变量结合问题的特点设计编码方式和遗传算子。并采用了一种快速的启发式方法求解运行子问题。通过个体适合度的评估对两个子问题进行协调。

1 数学模型

1.1 目标函数

本文以检修费用和运行成本以及购电费用作为目标。检修费用采用“时间窗”的计算方法^[10]。目标函数可以表示如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i,k} (C_{it}(1-x_{it}) + C_{kt}(1-x_{kt})) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N A_{it} \times C_i(W_{it}) + \sum_{t=1}^T CB_t \cdot PB_t \quad (1)$$

式中: C_{it} 表示机组 i 第 t 时段的检修费用; C_{kt} 表示

线路 i 第 t 时段的检修费用; x_{it} 表示机组 i 第 t 时段的检修状态: $x_{it}=0$ 表示检修, $x_{it}=1$ 表示未检修; A_{it} 表示机组 i 第 t 时段的开停机状态: $A_{it}=1$ 表示开机, $A_{it}=0$ 表示关机; W_{it} 表示机组 i 的第 t 时段的发电量, $C_i(W_{it})$ 表示能耗函数; N 表示全部机组总数, T 表示时段总数; CB_t 表示 t 时段的购电价格; WB_t 表示 t 时段的购电量。

1.2 约束条件

从式(1)可知目标函数可分为检修费用和运行成本。约束条件亦可分为检修约束和运行约束两类。

1.2.1 检修约束

$$\begin{cases} x_{it} = 1 & t < y_i \text{ 或 } t > y_i + d_i \\ x_{it} = 0 & y_i \leq t \leq y_i + d_i \\ e_i \leq y_i \leq l_i \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_i r_{ij}(1-x_{it}) \leq \alpha_{jt} \quad (3)$$

$$x_{it} = 1 \quad \text{if } a_i < t < b_i \quad (4)$$

$$\sum_{i \in p} (1-x_{it}) \leq b_p \quad \forall t, p \quad (5)$$

$$\sum_{k \in r} (1-x_{kt}) \leq b_r \quad \forall t, r \quad (6)$$

$$\sum_{i \in S_t} x_{it} \cdot P_{i\max} \geq (1+\mu)P_{Dt} \quad \forall t \quad (7)$$

$$\sum_{i \in C} x_{it} \geq U_C \quad \forall t, C \quad (8)$$

式(2)表示检修时间约束, 即机组或线路最好在时段 $[e_i, l_i]$ 内开始检修, y_i 表示检修起始时段, d_i 表示检修持续时段数; 式(3)表示检修资源约束, r_{ij} 表示机组(或线路) i 检修需要的 j 种资源的数量, α_{jt} 表示 t 时段可获得的 j 种资源总量; 式(4)表示机组和线路不允许检修时段约束; 式(5)表示电厂 p 内同时检修机组的最大台数限制 b_p ; 式(6)表示传输路径约束, 指 r 传输路径的多条联络线族中最多能同时检修的线路数 b_r 约束; 式(7)表示冷备用约束, P_{Dt} 表示电网 t 时段的负荷最大值, μ 为备用率, 通常取 7%~10%; 式(8)表示机群最小开机台数约束, 结合长期运行经验以及先期系统稳定分析的结论, 在个别地区存在电压稳定支撑的要求, 这些电厂需要长期投入运行一定数量 U_c 的机组。

1.2.2 发电运行约束

$$\sum_{i=1}^N A_{it} \cdot P_{it} = P_{Dt} \quad \forall t \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_{t \in \text{Month}} A_{it} \cdot W_{it} = W_{\text{Month}} \quad (10)$$

$$A_{it} \cdot P_{i \min} \leq P_{it} \leq A_{it} \cdot P_{i \max} \quad \forall i, t \quad (11)$$

$$-P_{S, \max \text{ in}} \leq \sum_{i \in S_t} P_{it} - P_{D_t - S_t} \leq P_{S, \max \text{ out}} \quad \forall t \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N A_{it} \cdot (P_{i \max} - P_{it}) \geq P_r \quad \forall t \quad (13)$$

$$\sum_{i \in H} P_{it} = \eta \underline{Q}_t \quad \forall t \quad (14)$$

$$SH_t = SH_{t-1} + \bar{Q}_t - \underline{Q}_t \quad (15)$$

式(9)表示电力平衡约束; 式(10)表示电量平衡约束, W_{Month} 表示月负荷电量需求; 式(11)表示机组容量约束, $P_{i \min}$ 和 $P_{i \max}$ 分别表示机组的最小和最大技术出力。应该指出水电机组由于受季节性的来水量影响, 其每个时段的最大出力和可发电量将不同, 该类数据由水文预测给出。式(12)表示区域断面流量约束, 反映了分区之间功率交换的限制。式(12)表示旋转备用约束, P_r 表示系统的旋转备用容量要求。式(14)表示水电发电出力和流量的关系, η 为常系数。式(15)表示水库储水量和流量的关系, \bar{Q}_t 和 \underline{Q}_t 分别表示流入和流出的流量。

2 算法

本文在遗传算法框架内, 将主问题分解为检修子问题和运行子问题。检修费用和检修约束构成检修子问题, 运行成本和运行约束构成运行子问题。对检修状态变量进行编码, 运行子问题求解适应度值。

2.1 遗传算法的编码方式

个体编码采用了如表 1 的元胞数组形式, 数组每一行的列数由该行的检修次数决定, 一次检修对应一组起始月和起始时段。

表 1 随机个体编码
Tab.1 The coding of random individual

序号	检修次数	第一次起始月	第一次起始时段	第二次起始月	第二次起始时段
U_1	m_1	y_{11}	z_{11}	y_{12}	z_{12}
U_2	m_2	y_{21}	z_{21}	y_{22}	z_{22}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
U_N	m_N	$y_{N,1}$	$z_{N,1}$	$y_{N,2}$	$z_{N,2}$
L_1	m_{N-1}	$y_{N-1,1}$	$z_{N-1,1}$	$y_{N-1,2}$	$z_{N-1,2}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
L_K	m_{N-K}	$y_{N-K,1}$	$z_{N-K,1}$	$y_{N-K,2}$	$z_{N-K,2}$

表中 U_i 表示机组的序号, L_i 表示线路的序号;

若检修次数 m_i 小于 2 则 y_{i2} 无定义。本文定义 5 天为一个时段, 一个月分为 6 个时段, 确定了检修起始月和时段就能确定检修的具体日期。

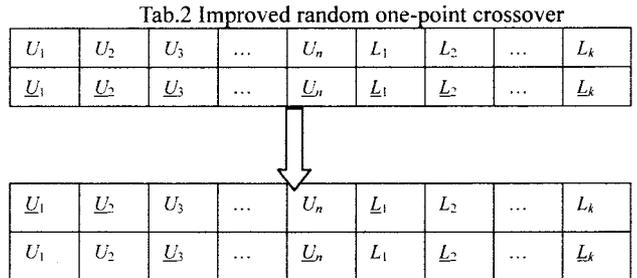
2.2 遗传算法的算子

初始化: 采用随机初始化的方法。遗传算法对于初始种群较为敏感, 好的初始种群能缩短寻优过程, 为此在初始化时考虑了约束条件式 2)、4), 在检修时间约束内随机产生起始检修时间点。

交叉: 采用改进的随机单点交叉, 交叉率为 0.4。由于机组检修应该配合电厂并网输电线路检修, 这样能有效地减少机组停机时间。单点交叉容易破坏机组和相关并网输电线路的检修配合关系, 需要对此做出改进。改进的随机单点交叉形式上表现为三点交叉, 只是后两交叉点不是随机产生。第二交叉点取机组 U_n 和线路 L_1 之间, 而第三交叉点依据机组和线路的关联关系确定。

首先需要将机组和线路的关键关系在编码时就按顺序排列, 即位置靠前的机组则关联线路也应靠前排列。假设随机交叉点产生于 U_2 和 U_3 之间, 依据机组和线路的关联关系有 U_1 、 U_2 关联 L_1 而 U_3 关联 L_2 , 那么第三交叉点可确定在 L_1 和 L_2 之间。三点交叉的示例参见表 2。

表 2 改进的随机单点交叉



变异: 采用均匀变异, 变异率为 0.02。

适应度函数: 每个编码个体代表一个检修方案。对编码个体进行解码, 得到全年每个时段的机组及线路检修方案。基于该检修方案使用启发式方法快速求解运行子问题。

在每个时段上将检修设备退出, 然后制定机组发电计划。该系统是一个水火混合电力系统, 需要进行水火电协调。首先, 依据水文预测的相关数据可以得到该时段各水电机组的可发最大出力和电量。其中要考虑水库的调节能力问题, 对有调节能力的水库其机组检修时不弃水或尽量少弃水, 其总发电量不变或少量减少。还要考虑梯级水电检修配合问题, 实际系统中存在多个一个大型调节水库带下游几个径流水电站的情况, 它们配合检修才能充分利用水资源。依据负荷预测的系统最大负荷和

电量需求可以求得火电的最大出力和电量需求。特别要注意的是,此处求得火电的最大出力和电量,往往存在着电力与电量不匹配的问题,超出了火电机组实际运行时的调节能力。比如说,电力过多而电量过少,即是说,火电机组的发电利用小时数过低,这在电力系统实际运行时是难以实施的。本文中采用的每天发电利用小时数范围为[15.12, 22.8]。为此,需要进行电力电量平衡校核。如果火电发电利用小时数低于下限值,则减少水电发电量,增加火电发电量;如果火电发电利用小时数高于上限值,则减少水电出力,增加火电出力。此外,还有可能存在检修后系统发电容量不够的问题,则需要从外网购买并支付较高的电费。通过以上调整最终使得电力电量达到平衡,同时也确定了水、火电机组的发电出力和电量以及外购电量。

下面的工作就是要确定具体的机组组合。依据国家发改委颁布的《节能发电调度办法(试行)》确定的机组排序原则,采用优先顺序表法可以快速地制定机组组合,并校核区域联络线容量限制。确定每台机组的发电出力和发电量。

最后将所有时段的检修费用与发电能耗以及购电费用之和取其倒数作为该个体的适应度值。

3 算例分析

本文以四川电网为例进行数值分析。该系统包括 119 台机组,其中无调节能力的水电机组 56 台,有调节能力的水电机组 17 台,供热发电机组 3 台,燃气发电机组 9 台、燃煤发电机组 34 台。该系统具有水电比重较大的特点,因此水电受季节影响的特点在该系统表现尤为明显。本文依托四川省电力系统的特点,结合长期运行的经验,对大系统进行区域划分,确定出和发电机组有关联关系的输电联络线以及区域断面联络线,将其作为需要和发电设备协调检修的对象以及运行过载问题监测点。而其他的输电线路的检修对发电机组的运行影响极小或根本不影响,因此无需和发电机组联合检修。确定出需要联合协调安排检修的输电线路 26 条。该电力系统由四个区域通过联络线连接成一个大的发输电网络。其他数据包括四个区域各自逐月的负荷最大电力和电量需求,各机组容量、分区、分类(按七大类划分)及检修任务数据,各线路检修任务数据,区域之间的联络线传输容量,电厂并网线检修时电厂降额容量。该降额容量不等同于线路的热稳定极限,而是通过电压稳定计算得到的容量限制。

仿真计算得出发输电设备的检修计划优化结果如表 3。

表 3 机组检修计划

Tab. 3 Maintenance schedule of units

机组编号	检修周期	起始月份	起始日期	机组编号	检修周期	起始月份	起始日期
1	10	5	6	61	15	2	6
2	15	10	6	62	30	2	1
3	40	10	21	63	30	1	1
4	20	6	21	64	15	3	6
5	10	10	21	65	15	1	11
6	35	8	21	66	15	1	26
7	15	10	21	67	30	2	16
8	20	10	1	68	10	1	6
9	15	6	26	69	10	1	21
10	50	8	21	70	10	2	16
11	0			71	10	1	6
12	25	6	6	72	10	1	16
13	15	3	21	73	10	2	16
14	15	6	6	74	20	3	1
15	40	4	26	75	5	3	1
16	15	10	6	76	5	2	11
17	30	7	21	77	5	1	11
18	15	6	21	78	10	1	16
19	30	5	11	79	10	2	16
20	0			80	10	2	6
21	0			81	10	3	1
22	0			82	10	2	16
23	15	2	6	83	10	1	16
24	15	8	6	84	25	1	1
25	10	5	11	85	10	1	1
26	25	11	26	86	5	1	11
27	15	6	1	87	0	6	21
28	20	6	16	88	0		
29	20	8	21	89	0		
30	0			90	0		
31	0			91	0		
32	0			92	0		
33	0			93	0		
34	0			94	20	1	26
35	0			95	20	5	6
36	0			96	10	4	16
37	0			97	10	7	11
38	0			98	0		
39	0			99	0		
40	0			100	0		
41	0			101	0		
42	0			102	0		
43	0			103	0		
44	0			104	15	2	1
45	0			105	15	1	11
46	0			106	15	4	6
47	20	12	6	107	30	3	1
48	20	3	16	108	0		
49	20	2	1	109	0		
50	20	2	11	110	0		
51	20	1	1	111	0		
52	35	3	1	112	0		
53	15	1	16	113	10	7	16
54	15	2	1	114	10	5	6
55	15	4	1	115	0		
56	30	3	1	116	0		
57	15	12	11	117	0		
58	15	1	11	118	10	8	11
59	15	3	26	119	10	9	11
60	15	3	6				

表 4 线路检修计划

Tab.4 Maintenance schedule of line

线路 编号	检修 周期	起始 月份	起始 日期	线路 编号	检修 周期	起始 月份	起始 日期
1	15	7	11	14	10	1	16
2	10	7	6	15	10	3	6
3	10	2	6	16	10	10	16
4	10	8	6	17	10	2	26
5	10	10	1	18	10	1	6
6	10	6	16	19	10	2	16
7	10	12	6	20	10	2	16
8	10	3	1	21	10	1	1
9	10	1	21	22	10	1	1
10	10	1	6	23	10	3	21
11	10	1	6	24	10	3	6
12	10	1	21	25	10	5	1
13	10	3	6	26	10	2	11

实际运行采用的专家经验人工编制的计划参见文献[15]。将算例计划与专家经验人工编制计划对比,算例的运行成本为1345.0万吨标准煤,而专家经验的运行成本为1354.0万吨标准煤,二者都没有产生购电费用。数据表明本文提出的检修计划协调优化方法比人工编制检修计划节能高达0.66%,这得益于对系统中大量水电的充分利用。并且算例计划能满足全部约束条件,为可行解,而专家经验计划有部分约束条件不满足,其中包括部分检修资源约束和电厂约束,表明本文所提方法更能确保检修计划的可行性。

4 结论

本文建立了电力系统发输电设备联合检修计划问题的实用化模型,提出的约束条件使得模型更贴近实际问题。采用遗传算法和启发式方法相结合对模型进行了求解,结合问题特点的遗传算子提高了算法的效率。仿真算例表明本文所提出的检修计划问题的模型和算法的可行性和有效性。

参考文献

[1] 丁明,冯永青.发电机组检修计划的可靠性和经济性研究[J].中国电力,2001,34(7):22-25.
DING Ming, Feng Yong-qing. Review of Reliability and Economy Problems in Generator Maintenance Scheduling[J].China Electric Power,2001,34(7):22-25.

[2] 丁明,冯永青.发输电设备联合检修安排模型及算法研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):18-23.
DING Ming, FENG Yong-qing. Research on the Modeling and Algorithm to Global Generator and Transmission Maintenance Scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(5):18-23.

[3] Garver L L. Adjusting Maintenance Schedules to Levelize Risk[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and

Systems,1972,91(5):207-2063.

[4] CHEN L N, Toyoda J . Maintenance Scheduling Based on Two-level Hierarchical Structure to Equalize Incremental Risk[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(4) : 1510-1516.

[5] Marwali M K C, Shahidelour S M. A Decomposition Approach to Generation Maintenance Scheduling with Network Constraints[J]. APC Proc, 1997: 110-115.

[6] Silva E L, Morozowski M, Fonseca L G S. Transmission Constrained Maintenance Scheduling of Generating Units a Stochastic Programming Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems,1995,10(2): 695-701.

[7] Marwali M K C, Shahidelour S M. Long-term Transmission and Generation Maintenance Scheduling with Network, Fuel and Emission Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999, 14(3): 1160-1165.

[8] 魏少岩,徐飞,闵勇.输电线路检修计划模型[J].电力系统自动化,2006,30(17):41-44.
WEI Shao-yan, XU Fei, MIN Yong. Modeling on Maintenance Scheduling of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2006, 30(17): 41-44.

[9] Marwali M K C, Shahidelour S M. Short-term Transmission Line Maintenance Scheduling in a Deregulated System[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(3): 1117-1124.

[10] Marwali M K C, Shahidelour S M. Integrated Generation and Transmission Maintenance Scheduling with Network Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998, 13(3): 1063-1068.

[11] 舒隽,张粒子,黄超.市场环境中长期发输电协调检修计划优化[J].电力系统自动化,2007,31(02):14-19.
SHU Juan, ZHANG Li-zi, HUANG Chao. Mathematical Model of Coordinational Generation and Transmission Maintenance Scheduling in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(02): 14-19.

[12] Hyunchul Kim, Yasuhiro Hayashi, Koichi Nara. An Algorithm for Thermal Unit Maintenance Scheduling Through Combined Use of GA, SA and TS [J]. IEEE Trans on Power Systems,1997,12(1): 329-335.

[13] 陈少华,杨澎,周永旺,等.遗传和模拟退火算法在发电机组检修计划中的应用[J].电力系统自动化,1998,22(7):44-46.
CHEN Shao-hua, YANG Peng, ZHOU Yong-wang, et al. A Method Combining Genetic Algorithm with Simulated Annealing Approach for Thermal Unit Maintenance Scheduling[J].Automation of Electric Power Systems, 1998,22(7):44-46.

[14] Burke E K, Smith A J. Hybrid Evolutionary Techniques for the Maintenance scheduling Problem[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(1): 122-128.

(下转第128页 continued on page 128)

社,1985.
 YU Er-keng. Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electrical Engineering Publishing House, 1985.

[9] 兰华, 李积捷. 电力系统状态估计算法的研究现状和展望[J].继电器, 2007,35(10):78-82.
 LAN Hua, LI Ji-jie. Status Quo and Prospect of Algorithm of Power System State Estimation[J]. Relay, 2007,35(10):78-82.

[10] 张海波, 李林川. 电力系统状态估计的混合不良数据检测方法[J].电网技术,2001,25(10):17-20.
 ZHANG Hai-bo, LI Lin-chuan. A Hybrid Approach for Detection of Bad Data in Power System State Estimation[J]. Power System Technology, 2001,25(10): 17-20.

[11] 刘浩, 刘玉田. 模糊数学在状态估计不良数据检测辨识中的应用[J].电力系统及其自动化学报,1996,8(3):52-59.
 LIU Hao, LIU Yu-tian. The Application of Fuzzy

Mathematics at Bad Data Detection and Identification of State Estimation[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 1996,8(3):52-59.

[12] 张兴民,毛玉华,等. 利用图论方法进行多不良数据检测与辨识[J].中国电机工程学报,1997,7(1):69-72.
 ZHANG Xing-min, MAO Yu-hua, et al. Detection and Identification of Multi-bad Data Using Graph Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 1997,7(1): 69-72.

[13] Draft IEC61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API)-Part 501: CIM RDF Scsema[S].

收稿日期: 2008-12-22; 修回日期: 2009-06-17

作者简介:

许凯宁(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统无功优化; E-mail: xkn_ujn_edu@sina.com
 程新功(1973-),男,副教授,硕士生导师,主要从事电压无功优化的研究工作。

(上接第 75 页 continued from page 75)

[15] 张蓓.四川电网发输电设备检修计划的协调优化(工程硕士论文)[D].重庆:重庆大学,2008.
 ZHANG Bei. Coordination Optimization of Generation and Transmission Maintenance Scheduling for Sichuan Power Grid, Thesis[D]. Chongqing: Chongqing University,2008.

收稿日期: 2008-12-17; 修回日期: 2009-03-05

作者简介:

颜伟(1968-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行与控制;
 温元喜(1977-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制; E-mail:wenyuanxi@yahoo.com.cn
 张蓓(1972-),女,硕士,从事电力系统运行调度工作。

(上接第 117 页 continued from page 117)

[3] GB 1208-2006,电流互感器[S].

[4] 电力工业部:电安生[1994]191号电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点[S].

[5] 郭志忠.电子式电流互感器研究评述[J].继电器, 2005, 33(14): 11-14, 22.
 GUO Zhi-zhong. Comment on the Research of Electronic Current Transformers[J]. Relay, 2005, 33(14): 11-14, 22.

[6] 黄学卫,董玉玲,董丽丽.数字化变电站中的非常规互感器[J].电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 89-92.
 HUANG Xue-wei, DONG Yu-ling, DONG Li-li. Unconventional Mutual Inductor of Digital Station[J].

Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 89-92.

收稿日期: 2009-06-17; 修回日期: 2009-08-21

作者简介:

王泱(1972-),女,工程师,硕士,主要从事电力系统分析、运行与控制的教学研究与管理工作;
 及洪泉(1972-),男,高级工程师,博士,主要从事光学电流互感器及其在电力系统中的应用以及电力系统分析、运行与控制的研究和管理工作。E-mail: Jihongquan@126.com