

电力系统运行可靠性在线控制

何 剑, 孙元章, 程 林, 刘海涛

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Operational Reliability On-line Control of Power Systems

HE Jian, SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The research on how to avoid power system's operational risks and enhance its operational reliability through controls from the dispatching centre is of great significance. The model and corresponding algorithm of the operational reliability on-line control are proposed. The fundamental function of the operational reliability on-line control is interpreted at the beginning of the paper. The indices and algorithm of the short-term operational reliability are proposed as the basis of the operational reliability control. And then the mathematical model of the operational reliability control is developed, in which the objective function is minimizing the cost of the control, the control variables are power injections and load curtailments, the constraints are operational reliability criteria. The improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is established for searching the solution. The calculation results of the IEEE RTS-79 system verify the effectiveness of the model and algorithm.

KEY WORDS: operational reliability; on-line control; power system; particle swarm optimization; probabilistic risk

摘要: 研究如何通过调度控制来规避电力系统运行的风险、提高电力系统的运行可靠性具有重要的意义。提出运行可靠性在线控制的模型和算法。首先阐述运行可靠性在线控制的基础与功能定位, 然后提出短期运行可靠性评估的指标和算法, 在此基础上建立运行可靠性控制的数学模型, 该模型以控制代价最小为目标函数, 以发电机出力调整量和节点切负荷量为控制变量, 以运行可靠性指标则为约束条件, 采用改进的粒子群智能优化算法进行搜索。对 IEEE RTS-79 测试系统的计算分析表明运行可靠性控制模型和算法的有效性。

关键词: 运行可靠性; 在线控制; 电力系统; 粒子群算法;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB-217908)。

The National Basic Research Program of China(973 Program)(2004CB217908)。

概率风险

0 引言

美国“8.14”大停电^[1]发生后, 世界各地又发生了多起大面积停电事故, 如英国伦敦大停电、印尼大停电、莫斯科大停电和海南大停电等。2006年11月4日, 欧洲多个国家发生了大面积停电事故, 使欧洲UCTE互联网解裂为3个孤岛^[2]。这些大停电事故造成了严重的社会损失和经济损失, 使人们更加关注电力系统运行的安全性和可靠性。由于许多大停电事故的诱因是电力系统运行的不确定性, 例如发电机、线路等电力系统元件的随机故障、负荷的随机变化、电力市场的随机波动等, 因此研究如何通过控制来规避或降低系统的运行风险, 对于预防大停电事故的发生具有重要意义。

当前基于EMS/SCADA的安全约束调度已广泛应用于电力系统的调度运行^[3-5]。实时安全约束调度能解决当前系统出现的越限现象, 预防性安全约束调度能消除某些潜在(即由预想事故引起)的不安全现象。在长期运行实践中, 安全约束调度发挥了重要作用。但由于它本质上仍属于基于确定性准则的调度方式, 因而难以处理电网运行的不确定性因素, 无法定量评估运行风险, 并给出规避风险的控制策略。因此亟需计及各种不确定性影响的新方法来补充和完善现有的电力系统在线控制理论。

另一方面, 概率评估的方法在电力系统运行领域的应用^[6]为规避系统运行风险提供了必要的基础。可靠性评估^[7-8]和风险评估^[9-12]已实现了在线应用, 电力系统运行可靠性的研究也取得了一些开拓性成果^[13-14]。这些评估方法的共同特点是考虑了电网运行的不确定性, 并能对运行中的电力系统给出

概率性的评价指标,为调度员提供监测电网运行风险的途径。但目前这些研究成果主要集中在评估算法和评估指标的建立上,而如何充分利用这些概率性的评估结果指导电网的运行和控制却研究得较少。

在这样的背景下,本文提出电力系统运行可靠性在线控制的模型和算法,目的在于为调度人员提供在线的辅助控制策略,以规避电网在不确定性环境下的运行风险,从而提高电力系统的运行可靠性。

1 运行可靠性在线控制的基础与功能定位

本文提出的运行可靠性在线控制的目的是通过对可控量的调整规避电网运行的风险,提高电网的运行可靠性。因此,定量地评定系统运行的潜在风险必然成为运行可靠性在线控制的基础。

运行可靠性评估的研究^[13-15]为定量评估系统风险和可靠性水平提供了新工具,这样能考虑实时运行状态对系统运行可靠性的影响,能利用WAMS/EMS提供的实时信息对运行中的电力系统进行风险评估。

作为一种计及不确定性的电力系统分析和控制工具,运行可靠性在线控制是安全约束调度^[5]等一些确定性分析和控制工具的有力补充,它定位于在线辅助决策,通过调度员的参与形成如图 1 所示的控制系统。

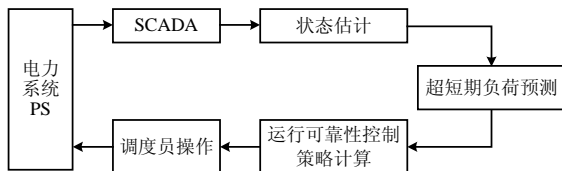


图 1 运行可靠性在线控制

Fig. 1 Operational reliability on-line control

通过 SCADA 系统收集到电力系统的大量实时测量数据,经状态估计获得电网网络拓扑结构等运行工况,并由短期发电计划和超短期负荷预测得到下一时刻(未来数分钟或数小时内)的发电机出力和负荷水平,然后将这些运行信息作为输入数据进行运行可靠性控制策略计算。在线计算出的控制方案成为调度决策依据,最终由调度员对电网实施控制。

运行可靠性在线控制策略的刷新周期可根据负荷预测的刷新周期而定。目前 EMS 系统一般都具有 96 点超短期负荷预测的功能,因此运行可靠性在线控制策略的刷新周期可取 15 min。

2 运行可靠性控制模型及算法

2.1 短期运行可靠性评估模型和指标及算法

2.1.1 元件可靠性模型

电力系统元件的随机故障是影响系统运行可靠性水平的重要因素。为预测电力系统在未来 $[0,t]$ 时段内的短期可靠性水平,必须建立与时间相关的元件状态概率模型。本文采用基于齐次 Markov 过程的元件瞬时状态概率来完整地描述元件的可靠性模型^[15-16]。同时为反映运行状态对元件停运率的影响,本文采用文献[14]的方法对发电机和线路停运率建模。

设元件停运率为 λ ,修复率为 μ ,经历时间 t 后元件处于工作状态和停运状态的瞬时状态概率分别为 $p_0(t)$ 和 $p_1(t)$ 。根据齐次 Markov 过程,如果元件初始时刻处于工作状态,可有

$$[p_0(t), p_1(t)] = \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (1)$$

如果元件初始时刻处于停运状态,可有

$$[p_0(t), p_1(t)] = \left[-\frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (2)$$

具有 n 个元件的系统,其系统状态的数量为 2^n 。系统在 t 时刻处于某一状态 k 的瞬时概率为

$$P_k(t) = \prod_{j \in W} p_{j,0}(t) \prod_{k \in F} p_{k,1}(t) \quad (3)$$

式中: $p_{j,0}(t)$ 为 j 元件处于工作状态的概率; $p_{k,1}(t)$ 为 k 元件处于停运状态的概率; W 和 F 分别表示在系统状态 S 中工作元件和停运元件的集合。

2.1.2 短期运行可靠性指标

传统的可靠性评估主要以切负荷指标来度量系统可靠性水平。这些指标在指导系统长期或短期的电源规划和输电规划等方面发挥了重要作用。然而在电网实际运行中,调度人员关心的不仅是节点和系统的电量不足期望值,还关心运行状态量如线路潮流、节点电压、系统频率等是否越限。虽然传统可靠性指标如电量不足期望值 E_{ENS} 等隐含了对线路过负荷、母线电压越限、系统功率不平衡等故障严重程度度量,但并没有直接定义此类型的指标,难以实现对薄弱环节的定位,进而有针对性地实施控制。本文在传统可靠性指标的基础上,提出面向调度的运行可靠性指标体系:

(1) 运行状态量处于安全状态的概率指标。

$$P_{S_{X_i}} = P_r \{X_{i,\min} \leq X_i \leq X_{i,\max}\} = \sum_{k \in S_{X_i}} P_k(t) \quad (4)$$

式中： p_r 表示事件成立的概率； X_i 代表第*i*个运行状态量，如线路潮流 T 、母线电压 U 、系统频率 f 等； $X_{i,\min}$ 和 $X_{i,\max}$ 分别代表给定的下限值和上限值，若 X_i 运行在区间 $[X_{i,\min}, X_{i,\max}]$ 内，则认为该状态量处于安全状态； S_{X_i} 表示 X_i 处于区间 $[X_{i,\min}, X_{i,\max}]$ 内的系统状态的集合； $p_k(t)$ 表示 t 时刻出现系统状态 k 的概率；相应的指标 $p_{S_{X_i}}$ 分别代表线路潮流安全概率指标 p_{SLFi} 、母线电压安全概率指标 p_{SBVi} 和系统频率安全概率指标 p_{SF} 。

(2) 系统状态概率指标。

定义系统的安全状态为系统在该状态下满足所有安全约束，未出现系统状态量越限、负荷节点损失负荷等不正常的情况；定义紧急状态为系统中存在状态量处于越限状态，但并未出现失负荷的情况；定义极端紧急状态为系统中出现了失负荷的情况。系统处于上述3种状态的概率可统一表示为

$$p_{sys} = \sum_{k \in S_{sys}} P_k(t) \quad (5)$$

式中： p_{sys} 可代表系统处于某种状态的概率指标，如系统安全状态概率指标 p_S ，系统紧急状态概率指标 p_E 和系统极端紧急状态概率指标 p_{EE} ；相应的 S_{sys} 表示 t 时刻系统处于该状态的所有系统状态的集合。

(3) 电量不足期望值指标。

$$E_{ENS} = \sum_{k \in S} P_k(t) \cdot C_k \cdot t / 60 \quad (6)$$

式中： S 代表时间 t 内可能出现的所有状态的集合； C_k 表示该状态下由于功率不平衡、线路过载或母线电压越限导致的切负荷量，MW； E_{ENS} 表示时间 t 内的电量不足期望值，MW·h，该指标有节点指标和系统指标之分。

指标式(4)~(5)作为监测指标，可用于实时监测系统元件的可靠性水平，并可作为控制的约束条件，参与控制问题的在线求解；而式(6)作为验证指标，用于衡量可靠性变化所带来的收益或损失，不必参与控制问题的在线求解。

2.1.3 短期运行可靠性评估算法

电力系统短期运行可靠性评估包括4个主要部分：确定元件可靠性模型、选择系统状态、分析状态后果及计算可靠性指标。其中关键的2个步骤是系统状态筛选与状态分析。

短期运行可靠性评估的状态选择采用系统状态快速排序技术^[17]。该方法能按状态概率的大小顺

序排列出待分析的系统状态，并使 E_{ENS} 指标满足给定的误差要求。

系统状态后果分析采用动态潮流分析方法，以潮流分析的结果来判断并累计所定义的运行可靠性指标式(4)~(5)，以基于直流潮流的优化方法计算切负荷量^[18]，从而累计指标式(6)。

短期运行可靠性评估算法流程如图2所示。

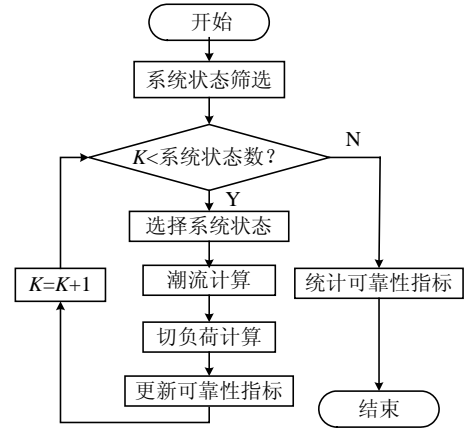


图2 短期运行可靠性评估算法流程图

Fig. 2 Flow chart of short-term operational reliability evaluation

2.2 运行可靠性控制模型

运行可靠性在线控制是在线的辅助决策控制，为适应大系统的实时计算要求，需要在保证计算结果满足一定精度的前提下，尽量提高计算的速度。因此本文的控制模型中系统潮流分析采用了直流潮流，模型中不考虑无功和电压约束。运行可靠性控制的数学模型可表示如下：

(1) 控制变量。

控制变量包括发电机有功出力 P_{Gi} 和负荷节点切负荷量 ΔP_{Dj} 。

(2) 目标函数。

考虑到控制的经济性，以调整量最小作为目标函数：

$$\min \left(\sum_{i \in N_G} a_i |\Delta P_{Gi}| + \sum_{j \in N_D} b_j \Delta P_{Dj} \right) \quad (7)$$

式中： ΔP_{Gi} 为节点*i*的发电机有功出力改变量； ΔP_{Dj} 为节点*j*的切负荷量； N_G 为所有发电机节点的集合； N_D 为所有负荷节点的集合； a_i 和 b_j 为权重系数，可分别取为发电机微增费用和单位负荷损失费用，一般情况下切负荷导致的损失远大于发电机调整的费用，因此系数 b_j 会远大于 a_i 。

(3) 约束条件。

控制变量约束中发电机有功出力约束为

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}, \quad i \in N_G \quad (8)$$

切负荷量约束为

$$0 \leq \Delta P_{Dj} \leq P_{Dj}, \quad j \in N_D \quad (9)$$

式中： $P_{Gi,\min}$ 和 $P_{Gi,\max}$ 分别为节点 i 的发电机有功出力的下限值和上限值； P_{Dj} 为节点 j 的有功负荷。

为保证控制后系统的系统安全状态概率指标 p_S 达到指定的水平，给定以下约束：

$$p_S \geq p_S^{\text{spe}} \quad (10)$$

式中 p_S^{spe} 为指定的系统安全状态概率。由运行可靠性评估算法可知，系统指标 p_S 给出了全系统处于安全状态的概率。因此在满足式(10)的前提下，运行状态量指标式(4)不会小于 p_S^{spe} ，因此一般情况下给定该约束即可。当然如果对特定的状态量有更高的可靠性要求，那么可在模型中加入需要的约束，如线路潮流安全概率指标约束：

$$P_{\text{SLFi}} \geq P_{\text{SLFi},\min}^{\text{spe}}, \quad i \in N_L \quad (11)$$

系统频率安全概率指标约束：

$$P_{\text{SF}} \geq P_{\text{SF},\min}^{\text{spe}} \quad (12)$$

式中： $P_{\text{SLFi},\min}^{\text{spe}}$ 和 $P_{\text{SF},\min}^{\text{spe}}$ 为给定的可靠性指标下限； N_L 为所有线路的集合。

2.3 算法实现

运行可靠性控制模型在数学上属于随机机会约束规划(chance constrained programming, CCP)问题^[19]，其显著特点是随机约束条件至少以一定的置信水平成立。对于一些特殊问题，可将机会约束转化为其确定的等价形式，然后对等价的确定模型进行求解^[20]，但是一般的问题是无法这样处理的。文献[21-22]等使用遗传算法来求解电力系统中的CCP问题，并取得了较好的效果。本文构造改进的粒子群算法来求解运行可靠性控制模型。

设搜索空间为 D 维，粒子数为 N ，粒子群中第 i 个粒子的位置为 $\mathbf{u}_i=(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iD})$ ，第 i 个粒子的速度为 $\mathbf{v}_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ，每个粒子的位置都是一个潜在解。每次迭代中，每个粒子通过跟踪 2 个“极值”来更新自己。一个是粒子 i 目前搜索到的最好位置 $\mathbf{W}_{\text{Best}i}=(W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{iD})$ ；另一个是整个种群目前搜索到的最好位置 $\mathbf{g}_{\text{Best}}=(g_1, g_2, \dots, g_D)$ 。第 $k+1$ 次迭代中第 i 个粒子第 d 维的速度 $v_{id}^{(k+1)}$ 和位置 $u_{id}^{(k+1)}$ 采用的更新方程^[23]为

$$\begin{cases} v_{id}^{(k+1)} = C \cdot [\omega \cdot v_{id}^{(k)} + c_1 \cdot r_1() \cdot (W_{id} - u_{id}^{(k)}) + c_2 \cdot r_2() \cdot (g_d - u_{id}^{(k)})] \\ v_{id}^{(k+1)} = v_{d\max}, \quad v_{id}^{(k+1)} > v_{d\max} \\ v_{id}^{(k+1)} = -v_{d\max}, \quad v_{id}^{(k+1)} < -v_{d\max} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} u_{id}^{(k+1)} = u_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \\ u_{id}^{(k+1)} = u_{d\max}, \quad u_{id} > u_{d\max} \\ u_{id}^{(k+1)} = u_{d\min}, \quad u_{id} < u_{d\min} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $r_1()$ 和 $r_2()$ 为 $[0,1]$ 区间的随机数； $u_{d\min}$ 和 $u_{d\max}$ 为粒子第 d 维的位置下限值和上限值； $v_{d\max}$ 为粒子第 d 维的最大速度限值，可取为搜索空间 $(u_{d\max} - u_{d\min})$ 的 50%； C 为约束因子， c_1 和 c_2 为加速因子， $C = 2 / |2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|$ ， $\varphi = c_1 + c_2$ ， $\varphi > 4$ ，如可取 $c_1 = c_2 = 2.05$ ； ω 为惯性权重因子，本文采用动态改变惯性权重的策略^[24]，使搜索方向的精确度得到启发性加强。

在约束条件的处理上，通过潮流计算可消除等式约束，使用自适应罚函数法^[24]来处理不等式约束。

在基本的PSO算法中，随迭代次数的增加，种群的多样性会不断降低，易产生“早熟”现象。本文通过在每步迭代中，按变异概率 p_m 选择种群中的除群体最优粒子外的若干个粒子进行变异操作^[25]，减少了粒子群陷入局部极值的可能性。

在优化问题的求解中，粒子的位置参数就是优化计算的控制量，粒子的适应度值就是目标函数值。在对粒子进行适应度计算时需要进行短期运行可靠性评估。算法收敛的条件为迭代达到给定最大步数，或最小适应度粒子在连续 m 步迭代内无变化。程序算法流程图如图 3 所示。

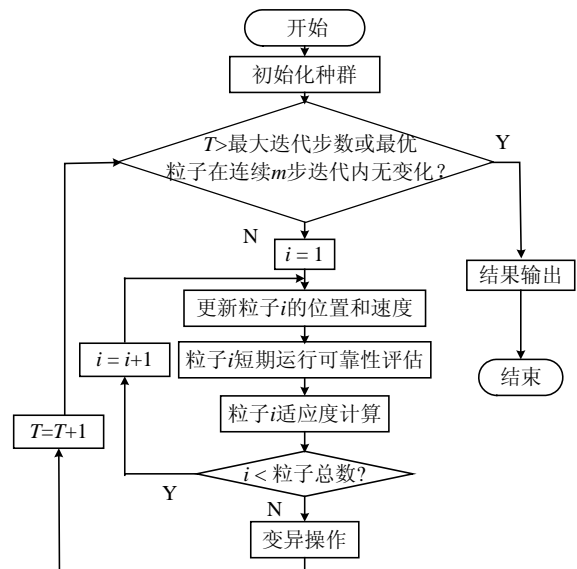


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of arithmetic

3 算例

3.1 短期运行可靠性评估

采用IEEE RTS-79 系统^[26]，系统总装机容量为

3 405 MW, 负荷为 2 850 MW。

设预测时间为 15 min, 对原系统进行短期运行可靠性评估, 评估结果如表 1 所示, 表中给出了系统各项可靠性指标。由于原系统给出的是规划系统数据, 投入所有机组后使发电备用为 16.3%, 从评估结果来看, 系统的运行可靠性水平很高。

实际系统的运行中, 出于经济性的考虑, 不会将所有备用都作为运行备用开启, 因此为更加符合实际系统的运行情况, 这里设置 Case1, 使系统运行备用为 4.07%, 即假设第 2、5、12 和 13 台机组(最大有功出力分别为 20、20、197 和 197 MW)处于停运状态, 系统容量为 2 971 MW, 在该状态下系统潮流正常。同时设置 Case2, 使其在 Case1 的基础上再停运 3 条线路 L16(节点 12 至节点 23)、L17(节点 13 至节点 23)和 L22(节点 15 至节点 24), 在该状态下线路 L14(节点 11 至节点 14)和 L18(节点 14 至节点 16)潮流越限。对 Case1 和 Case2 的系统进行可靠性短期评估, 得到的结果如表 1 所示。

表 1 系统运行可靠性指标
Tab. 1 Operational reliability indices

指标	原系统	Case1	Case2
p_S	0.998 278	0.996 890	0.000 000
p_E	0.001 722	0.003 110	0.999 067
p_{EE}	0.000 000	0.000 000	0.000 000
p_{SF}	0.998 278	0.996 890	0.000 000
p_{SLF14}	0.999 988	0.999 989	0.009 406
p_{SLF18}	0.999 988	0.999 989	0.001 676
$E_{ENS}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	$1.184 8 \times 10^{-5}$	0.058 2	237.240 1
$\Delta E_{ENS}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	7.13×10^{-8}	7.13×10^{-5}	7.13×10^{-1}
$\Delta E'_{ENS}/\%$	0.60	0.12	0.30
N_S	43 402	1 400	25
T_E/s	1 639	49	3

表 1 中 N_S 为可靠性短期评估选择的状态数; ΔE_{ENS} 为 E_{ENS} 的最大理论绝对误差, 即假设没有选择到的各个状态都损失了系统所有负荷对 E_{ENS} 指标的贡献; $\Delta E'_{ENS}$ 为 E_{ENS} 的最大理论相对误差, 即 $\Delta E'_{ENS} = \Delta E_{ENS} / E_{ENS}$ 。从表中可看到, 各种情况的相对误差 $\Delta E'_{ENS}$ 都小于 1%, 可认为筛选的状态数是足够的。

表 1 中 T_E 为评估计算消耗的时间(计算环境为微机 AMD3800+, Windows XP)。可看到, 在满足指标精度 $\Delta E'_{ENS}$ 的要求下, 系统可靠性越差, 评估所需时间越少。

3.2 运行可靠性控制策略计算

假设认为 Case1 和 Case2 系统目前的可靠性水平还未达到预定的目标, 并决定实施运行可靠性控制将 Case1 和 Case2 的 p_S 指标都提高到 0.997 以上。

控制模型参数的取法如下:

(1) 运行可靠性控制模型及参数。优化目标函数式(7)中的权重系数 a_i 和 b_j 分别取 1 和 5 000。线路潮流上限值 $T_{i,\max}$ 取线路的短期额定容量^[26]; 功率因数假设为 0.95; 频率的下限值 f_{\min} 和上限值 f_{\max} 分别取 49.8 和 50.2 Hz。

(2) 优化算法参数。粒子群规模取 300 个粒子, 变异概率取 0.15。收敛判据为: 最优粒子在连续 10 次迭代内无变化或总的迭代步数达到 100 步。

表 2 给出控制实施前后系统的各项可靠性指标, 其中 T_C 为计算控制策略所消耗的时间, 对于可靠性较低的系统, 算法能在更短的时间内计算出控制策略, 以供调度员决策参考。

表 3 为 Case1 和 Case2 的控制策略, 也即各节

表 2 控制前后系统运行可靠性指标对比
Tab. 2 Comparison of operational reliability indices before and after control

指标	Case1		Case2	
	控制前	控制后	控制前	控制后
p_S	0.996 890	0.997 397	0.000 000	0.997 050
p_E	0.003 110	0.002 603	0.999 067	0.002 065
p_{EE}	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
p_{SF}	0.996 890	0.997 397	0.000 000	0.997 050
p_{SLF14}	0.999 989	0.999 989	0.009 406	0.999 115
p_{SLF18}	0.999 989	0.999 989	0.001 676	0.999 115
$E_{ENS}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	0.058 2	0.058 2	237.240 1	0.000 0
T_C/s	12 673		263	

表 3 控制策略
Tab. 3 Control strategies

节点	Case1		Case2	
	$\Delta P_G/\text{pu}$	$\Delta P_D/\text{pu}$	$\Delta P_G/\text{pu}$	$\Delta P_D/\text{pu}$
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0.355
6	0	0	0	1.36
7	0.350 7	0	0.508 6	0
8	0	0	0	1.71
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	-0.088 9	0	0.61	2.65
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	-3	0
23	-0.261 8	0	-4.193 6	0
24	0	0	0	0

点的发电机出力调整量 ΔP_{Gi} 和切负荷量 ΔP_{Dj} , 功率基值为 100 MW。

从表 2~3 可看到, Case1 仅经过调整发电出力就使系统运行在安全状态的概率 p_s 得到了提高; 而 Case2 经过调整发电出力和切负荷的措施解除了线路潮流越限, 使线路L14 和L18 潮流安全状态的概率 p_{SLF} 得到了提高, 同时使系统的 p_s 指标处于指定的范围内, 达到了控制的目的。

4 结论

(1) 讨论了电力系统运行可靠性在线控制的功能定位。电力系统运行可靠性在线控制的目的是为调度员提供在线的辅助控制策略, 消除电网可能存在的安全隐患, 规避或降低电网运行的风险, 提高电力系统的运行可靠性水平。

(2) 建立了表征电力系统短期运行可靠性水平的指标体系, 并使用基于瞬时概率的短期运行可靠性评估算法来计算这些指标。

(3) 建立了电力系统运行可靠性控制的数学模型。该模型以控制代价最小作为目标函数, 以发电机出力调整量和节点切负荷量作为控制变量, 以运行可靠性指标则作为约束条件。

(4) 构造了改进的粒子群算法来求解运行可靠性控制的数学模型。算法也为求解一般的随机机会约束规划问题提供了新的思路和方法, 算例分析表明了算法的有效性。

参考文献

- [1] 郭永基. 加强电力系统可靠性的研究和应用——北美东部大停电的思考[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 1-5.
Guo Yongji. To focus on improving power system reliability-A pondering over the East North-America major blackout [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 1-5 (in Chinese).
- [2] 李再华, 白晓明, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-3.
Li Zaihua, Bai Xiaoming, Ding Jian, et al. Analysis of the western europe blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-3(in Chinese).
- [3] 于尔铿, 刘广一, 周京阳, 等. 能量管理系统(EMS)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] Faramarz M, Ralph M, Terry R. Energy management system[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2004, 2(5): 49-57.
- [5] 朱文东, 郝玉国, 刘广一, 等. 应用线性规划方法的安全约束调度[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4): 57-64.
Zhu Wendong, Hao Yuguo, Liu Guangyi, et al. Security constrained dispatch using linear programming[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(4): 57-64(in Chinese).
- [6] Task Force on Probabilistic Aspects of Reliability Criteria of the IEEE PES Reliability, Risk, and Probability Applications Subcommittee. Probabilistic security assessment for power system operations [C]. Proceedings of IEEE PES General Meeting, Denver, CO, USA, 2004.
- [7] 刘洋, 周家启, 谢开贵, 等. 基于 Beowulf 集群的大电力系统可靠性评估蒙特卡罗并行仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 9-14.
Liu Yang, Zhou Jiaqi, Xie Kaigui, et al. The parallel Monte-carlo simulation of bulk power system reliability evaluation based on Beowulf cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 9-14(in Chinese).
- [8] 王韶, 卢继平, 周家启. 基于 PC 机群的发输电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 34-39.
Wang Shao, Lu Jiping, Zhou Jiaqi. Reliability assessment of composite generation and transmission systems based on personal computer cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 34-39(in Chinese).
- [9] Ni Ming, Mccalley J D, Vittal V, et al. On-line risk-based security assessment[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.
- [10] Ni Ming, Mccalley J D, Vittal V, et al. Software implementation of online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(3): 1165-1172.
- [11] 冯永青, 吴文传, 孙宏斌, 等. 现代能量控制中心的运行风险评估研究初探[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 73-79.
Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Sun Hongbin, et al. A preliminary investigation on power system operation risk evaluation in the modern energy control center[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 73-79(in Chinese).
- [12] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 20-25.
Chen Weihua, Jiang Quanyuan, Cao Yijia. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 20-25(in Chinese).
- [13] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12.
Sun Yuanzhang, Cheng Lin, Liu Haitao. Power system operational reliability evaluation based on real-time operating state[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12(in Chinese).
- [14] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与停运率建模[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 6-11.
Liu Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Outage factors analysis and outage rate model of components based on operating conditons [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 6-11(in Chinese).
- [15] Cheng Lin, Liu Haitao, Zou Xin, et al. Short-term reliability online evaluation basing on transient state probability [C]. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [16] Lian Guangbin, Billion R. Operating reserve risk assessment in composite power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(3): 1270-1276.
- [17] Liu Haitao, Sun Yuanzhang, Wang Peng, et al. A novel state selection technique for power system reliability evaluation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(6): 1019-1027.
- [18] Li Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods and applications[M]. New York, USA: IEEE Press and Wiley & Sons

- Inc., 2005.
- [19] Liu Baoding. Theory and practice of uncertainty programming [M]. Heidelberg, Germany: Physica-Verlag, 2002.
- [20] Yahia Z M, Ahmad D. A linear approximation method for solving a special class of the chance constrained programming problem [J]. European Journal of Operational Research, 1995, 80(1): 213-225.
- [21] 杨宁, 文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23-27.
Yang Ning, Wen Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (14): 23-27(in Chinese).
- [22] 李益国, 沈炯, 刘西陲. 基于机会约束规划的发电公司竞标策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 120-123.
Li Yiguo, Shen Jiong, Liu Xichui. A new bidding strategy for power plants based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 120-123(in Chinese).
- [23] Eberhart R, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, La Jolla, CA, USA, 2000.
- [24] 李国庆, 陈厚合. 改进粒子群优化算法的概率可用输电能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 18-23.
Liu Guoqing, Chen Houhe. Study of probabilistic available transfer capacity by improved particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (24): 18-23(in Chinese).
- [25] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.
Hou Yunhe, Lu Lijuan, Xiong Xinyin, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100(in Chinese).
- [26] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.



何 剑

收稿日期: 2007-10-23。

作者简介:

何 剑(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性、电力系统分析与控制, j-he@mails.tsinghua.edu.cn;

孙元章(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 主要从事 FACTS、电力系统非线性控制、电力系统稳定性和电力系统可靠性等方面的教学和研究, syz@mail.eea.tsinghua.edu.cn;

程 林(1973—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事电力系统可靠性、电力系统分析与控制等方面的教学和研究, chenglin@mail.tsinghua.edu.cn。

(编辑 谷 子)