

## 基于运行风险的电力系统预防-校正协调控制策略

杨 珺<sup>1†</sup>, 姜 凯<sup>2</sup>, 李 扬<sup>3</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 国网山东省电力公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600; 3. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070)

**摘 要:** 将运行风险应用于预防控制与校正控制之间的协调问题中, 提出一种新的控制策略. 首先, 利用二层规划理论建立预防控制和校正控制的二层优化模型; 然后, 采用一种将内点法嵌入粒子群算法的混合解法进行该二层优化模型的求解; 最后, 利用 6 节点系统进行所提出模型与传统模型的对比性仿真. 仿真计算结果表明, 所提出控制策略在经济效益和运行风险方面的综合性能优于传统的安全约束调度方法, 从而验证了所提出策略的合理性.

**关键词:** 运行风险; 协调控制; 二层规划模型; 粒子群算法; 内点法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Prevention-correction coordinated control strategy for power system based on operational risk

YANG Jun<sup>1†</sup>, JIANG Kai<sup>2</sup>, LI Yang<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. SGCC Binzhou Power Supply Company, Binzhou 256600, China; 3. Beijing Guodiantong Network Technology Co Ltd, Beijing 100070, China)

**Abstract:** A new control strategy, namely prevention-correction coordinated control, is presented in this paper. Firstly, the bi-level programming model is used to establish the model of prevention-correction coordinated control. Then, a mixed method of applying the interior-point method into particle swarm optimization algorithm, is presented to solve the above model. Finally, through the comparative simulation on a 6-bus system between the proposed model and the traditional model, it is found that the coordination with the risk of preventive control and corrective control is superior to the traditional scheduling method with security constraints on the aspect of economy and operational risk.

**Keywords:** operational risk; coordination control; bi-level programming model; particle swarm optimization; interior-point method

### 0 引 言

电力系统在规模扩大和日益深入市场化运行的同时, 电网大规模新能源接入<sup>[1]</sup>、设备运行环境突变<sup>[2]</sup>、人为误操作<sup>[3]</sup>等不确定因素增多, 这对电力系统稳定调控提出了更高要求. 为了实现电网的可靠经济运行, 电网调度必须在考虑多种风险的同时追求安全性与经济性最大化, 并进行有效协调以获得最佳运行方式<sup>[4-5]</sup>. 为了帮助运行调度人员通过正确分析和决策来应对系统中的风险, 基于风险对电网运行进行分析与控制意义深远. 同时, 风险理论已应用于电力系统的运行安全分析<sup>[6]</sup>、故障防控<sup>[7]</sup>、脆弱性评估<sup>[8]</sup>、关键线路辨识<sup>[9]</sup>等领域, 并已取得大量成果, 这

为本文提出的基于风险的预防-校正协调控制策略奠定了良好基础.

风险理论的引入赋予了电网运行分析及控制更多的思路和方法, 主要体现在: 考虑预想故障概率; 根据需求定义故障的危害性后果; 控制目标多样化, 例如控制成本、收益、风险收益等; 决策空间的范围扩大, 不再局限于三道防线内部选择控制手段. 文献[10]以《电力系统安全稳定导则》为依据, 对基于风险的在线安全稳定控制决策进行了探索, 其目的不再局限于安全稳定运行, 还包括了控制系统风险的范畴; 文献[11]充分考虑了输电元件的实时运行态势, 以系统的总收益最大为目标构建了电网运行风险决策模

收稿日期: 2016-06-22; 修回日期: 2016-09-22.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61374124, 61433004); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N160404010); 国家电网公司科技项目(GWKJ2013-005).

作者简介: 杨珺(1976—), 男, 副教授, 从事电力系统稳定与控制、新能源发电及并网优化等研究; 姜凯(1992—), 男, 硕士生, 从事电力系统稳定与控制的研究.

†通讯作者. E-mail: yangjun@mail.neu.edu.cn

型;文献[12]则从多目标优化问题的角度出发,建立了多目标经济调度模型,旨在获得运行成本和风险的双重优化。

上述研究虽对运行风险的应用提供了良好的思路,但均局限于预防控制等单个控制手段的应用.预防控制和校正控制是保证电力系统安全稳定的两个控制手段,将运行风险应用于二者之间的协调可以提高控制策略的合理性和经济性<sup>[13]</sup>,但也对运行风险提出了更高要求:既要准确反映系统的安全水平,又要传递控制手段的信息.因此,运行风险不仅关注可能出现的事故状态,而且还关注事故状态下的安全校正措施的经济代价。

基于以上分析,针对预防控制和校正控制间的协调,本文将运行风险引入二者协调控制问题中,提出一种新的预防-校正协调控制策略,并建立二层规划模型.另外,作为求解数学模型的有效工具,粒子群算法及内点法在电力系统应用中已取得了较多成果<sup>[14-15]</sup>.由于二者特性存在互补,本文将采用内点-粒子群混合算法对所提出二层模型进行求解.最后,利用6节点测试系统,通过对所提出模型与传统模型进行对比性仿真,验证了新模型的合理性。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 运行风险的数学模型

运行风险被定义为:对系统面临的不确定因素,给出可能性与严重性的综合度量<sup>[16]</sup>.其数学表达式为

$$R(E_0) = \sum_{k \in N_c} P_r(E_k) S_{sev}(E_k). \quad (1)$$

其中: $E_0$ 为当前运行状态, $E_k$ 为系统中第 $k$ 个不确定故障状态, $N_c$ 为预想故障的数目, $P_r(E_k)$ 为 $E_k$ 发生的概率, $S_{sev}(E_k)$ 为 $E_k$ 状态下的后果严重程度。

由于本研究是基于运行场景的风险决策,在考虑故障状态时仅采用预想事件集下的故障状态.另一方面,由于故障状态下的发电机组在再调度和切负荷等安全校正措施下可以保证系统的安全稳定,由此产生的经济代价可以作为该故障状态下的后果严重程度,其数学表达式为

$$S_{sev}(E_k) = \sum_{\alpha \in NG} a_{\alpha} (PG_{\alpha}^0 - PG_{\alpha}^k) + \sum_{\beta \in ND} a_{\beta} C_{\beta}^k. \quad (2)$$

其中: $PG_{\alpha}^0$ 为事故前系统运行时第 $\alpha$ 个机组的有功出力值; $PG_{\alpha}^k$ 为由于第 $k$ 个事故发生,系统调整后第 $\alpha$ 个机组的有功出力值; $a_{\alpha}$ 为发电机组 $\alpha$ 紧急发电处理再调整的费用系数<sup>[13]</sup>; $C_{\beta}^k$ 为第 $k$ 个事故后第

$\beta$ 个母线上切负荷量; $a_{\beta}$ 为切负荷引起的赔付费用系数<sup>[17]</sup>。

故障状态下的严重程度计算可以通过如下的最优潮流模型得到<sup>[18]</sup>:

$$\min S_{sev}(E_k); \quad (3)$$

$$T(E_k) = A(E_k)(PG^k - PD + C^k); \quad (4)$$

$$\sum_{\alpha \in NG} PG_{\alpha}^k - \sum_{\beta \in ND} PD_{\beta} + \sum_{\beta \in ND} C_{\beta}^k = 0; \quad (5)$$

$$|PG_{\alpha}^k - PG_{\alpha}^0| \leq s\Delta T, \alpha \in NG; \quad (6)$$

$$0 \leq C_{\beta}^k \leq PD_{\beta}, \beta \in ND; \quad (7)$$

$$|T_{\gamma}(E_k)| \leq T_{\gamma}^{\max}, \gamma \in L. \quad (8)$$

其中: $C^k$ 、 $PG^k$ 分别为故障状态 $E_k$ 下的切负荷矢量及发电输出矢量; $s$ 为发电机组有功出力调整速率; $\Delta T$ 为电网允许的紧急再调整时间; $PD$ 为负荷功率矢量, $PD_{\beta}$ 是它的元素; $T(E_k)$ 为故障状态 $E_k$ 的有功潮流矢量, $T_{\gamma}(E_k)$ 是它的元素,代表第 $\gamma$ 个支路的有功潮流, $T_{\gamma}^{\max}$ 是上限; $NG$ 、 $ND$ 、 $L$ 分别是系统发电母线、负荷母线和支路的集合; $A(E_k)$ 是该状态下有功潮流和注入功率之间的关系矩阵。

### 1.2 预防控制和校正控制的二层优化模型

本文采用的协调控制策略不再片面强调预防控制或校正控制,力求在考虑不确定因素的情况下,以最小的风险来保证系统在不同故障状态下满足安全稳定约束条件.当预防控制在严重的故障场景下不能保证系统稳定时,由校正控制进行补充.协调控制的目标为:在满足不同工况约束条件下,使得控制成本与风险值之和最小。

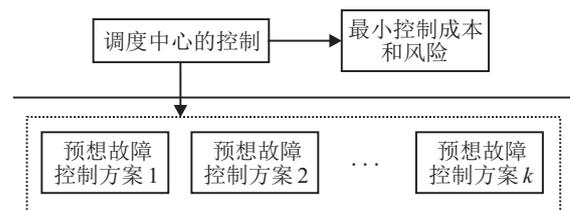


图1 协调控制的二层结构

按照上述分析,本文建立了一个二层多目标优化结构如图1所示.该模型上层描述预防控制模型,通过结合运行风险来计及校正控制的控制代价,试图以最小的控制成本和风险保证系统不同场景下的安全稳定.控制成本为

$$C_p = \sum_{\alpha \in NG} a_{\alpha} (PG_{\alpha}^0 - PG_{\alpha}^k). \quad (9)$$

模型上层表达式为

$$\min f = C_p + R(E_0); \quad (10)$$

$$T(E_0) = A(E_0)(PG^0 - PD); \quad (11)$$

$$\sum_{\alpha \in NG} PG_{\alpha}^0 - \sum_{\beta \in ND} PD_{\beta} = 0; \quad (12)$$

$$PG^{\min} \leq PG_{\alpha}^0 \leq PG^{\max}, \alpha \in NG; \quad (13)$$

$$|T_{\gamma}(E_0)| \leq T_{\gamma}^{\max}, \gamma \in L. \quad (14)$$

其中:  $PG^0$  为当前状态  $E_0$  下的发电输出矢量,  $PG_{\alpha}^0$  是它的元素,  $PG^{\min}$ 、 $PG^{\max}$  是其上限与下限;  $T(E_0)$  为当前状态  $E_0$  下的有功潮流矢量,  $T_{\gamma}(E_0)$  是它的元素;  $A(E_0)$  是该状态下有功潮流和注入功率之间的关系矩阵. 该模型下层由  $k$  个子问题构成, 分别表示各个校正措施在对应事故状态下的控制方案, 并以最小的控制代价为目标, 其数学模型由式(2)~(8)表示.

可以看出, 通过潮流计算的联系和相互协调作用, 上层问题的目标函数与下层问题的目标函数及约束相关联, 在已知反映系统安全校正措施代价的风险情况下, 优化预防控制措施的代价. 同时, 下层问题的约束及目标函数与上层问题的决策变量相关联, 在已知预防控制措施作用的前提下, 优化校正控制措施代价, 并将最优值反映到上层决策, 实现上下层决策的互动. 这种互动, 恰好能反映预防控制与校正控制间的配合关系.

## 2 模型的求解

鉴于所提出二层优化模型中, 上下层存在逻辑关联, 本文借助分层迭代的思想并采用内点-粒子群算法来求解双层规划模型. 求解时将其分为两层, 并把下层规划嵌套在上层规划的整体寻优过程中. 为了提高求解效率, 本文整体寻优采用自适应粒子群算法. 而下层问题采用原始-对偶内点法求解, 该法收敛迅速、鲁棒性强, 对大规模连续变量的非线性规划问题求解高效, 与自适应粒子群算法有机结合形成混合算法, 能有效求解本文所提出的模型.

### 2.1 自适应粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)模拟鸟类的群体行为: 每个个体通过利用迭代过程中自身和群体发现的最优位置来修正自身的寻优方向和速度, 从而寻求最优解. 在第  $k+1$  次迭代时, 第  $i$  个粒子的第  $d$  维的速度  $v_{i,d}^{k+1}$  和位置  $x_{i,d}^{k+1}$  分别为

$$v_{i,d}^{k+1} = wv_{i,d}^k + c_1r_1(p_{besti,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2r_2(g_{besti,d}^k - x_{i,d}^k), \quad (15)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1}. \quad (16)$$

其中:  $w$  为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$  为加速因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为在区间  $[0, 1]$  上均匀分布的随机数;  $p_{besti,d}^k$ 、 $g_{besti,d}^k$  分别为

第  $d$  维粒子  $i$  的历史最佳位置和粒子群目前为止的历史最佳位置.

惯性权重的改变对算法的性能影响很大, 传统的惯性权重改变方式都是让其随迭代次数线性减少. 本文采用文献[19]中的方式, 利用种群信息引导  $w$  进行调整, 即

$$D(t) = \frac{1}{mL} \sum_{i=1}^m \sqrt{\sum_{d=1}^n (x_{id} - \bar{x}_d)^2}, \quad (17)$$

$$w = \frac{1}{1 + e^{-12[D(t)-0.5]}}. \quad (18)$$

其中:  $m$  和  $n$  分别为粒子群个数和解空间维数;  $L$  为搜索空间中最大长度;  $x_{id}$  为粒子  $i$  第  $d$  维坐标值;  $\bar{x}_d$  表示所有粒子第  $d$  维坐标值的平均值;  $D(t)$  定义为平均粒距, 反映各个粒子间的分布离散程度.

为了既增强全局搜索能力, 又不降低收敛速度和搜索精度, 当平均粒距小于阈值  $D_{\min}$  后, 保留历史最优粒子位置并对部分粒子进行扰动, 以尽可能搜索更大范围的解空间. 扰动过程如下:

1) 按扰动比例  $\alpha$  选取扰动粒子;

2) 确定扰动参数  $\beta$ ,  $\beta$  与  $w$  服从相同的分布, 并按下式改变选中粒子的位置:

$$\bar{x}_{id} = \beta \text{random}[x_{d\min} - x_{d\max}, x_{d\max} - x_{d\min}] + x_{id}. \quad (19)$$

其中:  $\bar{x}_{id}$  为第  $i$  个粒子位置向量第  $d$  个分量扰动后的值,  $x_{d\max}$ 、 $x_{d\min}$  分别为  $x_{id}$  的上下限.

### 2.2 适应函数构造和算法流程

在求解上层问题时, 需要对约束进一步处理, 控制变量的范围由可行域进行约束, 潮流约束和线路潮流的越限将以罚函数的方式加入到目标函数中. 罚

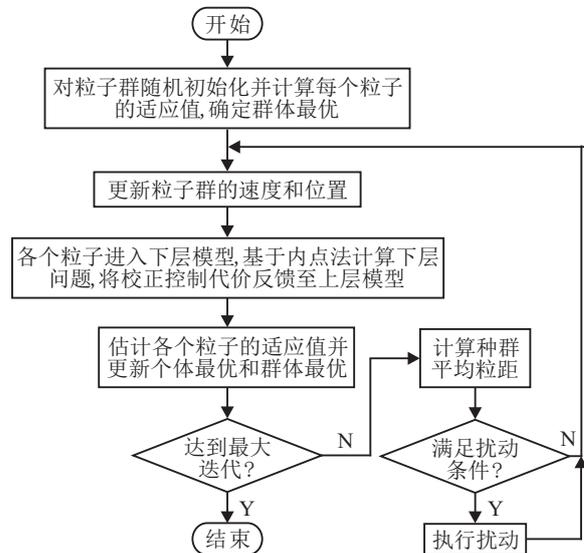


图2 二层规划问题的算法流程

函数形式为

$$F = f + \alpha_n \left| \sum_{\alpha \in NG} PG_{\alpha}^0 - \sum_{\alpha \in ND} PD_{\beta} \right| + \alpha_n \sum_{\gamma \in L} h(T_{\gamma}); \quad (20)$$

$$h(T_{\gamma}) = \begin{cases} 0, & T_{\gamma}^{\min} \leq T_{\gamma} \leq T_{\gamma}^{\max}; \\ \text{abs}(T_{\gamma}^{\min} - T_{\gamma}), & T < T_{\gamma}^{\min}; \\ \text{abs}(T_{\gamma}^{\max} - T_{\gamma}), & T > T_{\gamma}^{\max}. \end{cases} \quad (21)$$

其中:  $\alpha_n = 100\sqrt{n}$  为惩罚系数,它随着迭代次数  $n$  的增加而增加;  $h(T_{\gamma})$  为自定义函数.

本文采用改进的粒子群算法求解该二层规划问题,其流程如图2所示.

### 3 算例分析

本文基于 Matlab 编程环境,以图3所示6节点电力系统为例进行计算和分析.系统中的各个负荷均为70MW,不考虑负荷的等级,设置切负荷引起的赔偿费用系数  $a_{\beta} = 1000 \text{ \$/MW}$ . 预想事件发生后的紧急容许再调度时间设定为  $\Delta T = 5 \text{ min}$ .

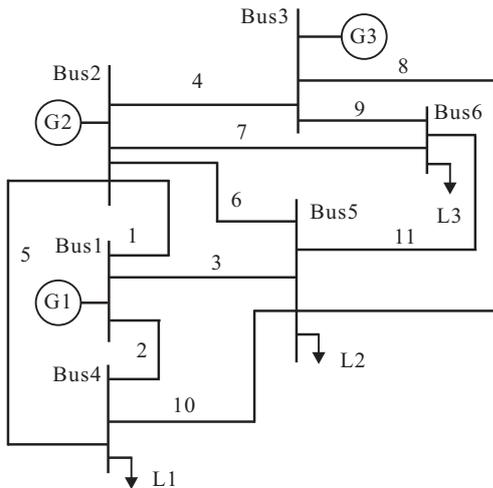


图3 6节点测试系统结构

分别对OPF(优化潮流)、PSCOPF(计及预防控制的优化潮流)、CSCOPF(计及校正控制的优化潮流)以及本文所提出模型在该测试系统下的结果进行对比,如表1所示. 其中:  $P_{G1}$ 、 $P_{G2}$ 、 $P_{G3}$  分别为实施相应调度策略后,发电机G1、G2、G3的有功输出;  $C(E_0)$  为初始状态  $E_0$  下的运行成本;  $R$  为风险值.

表1 测试结果对比

方式	模型	$P_{G1}/\text{MV}$	$P_{G2}/\text{MV}$	$P_{G3}/\text{MV}$	$C(E_0)/\text{\$}$	$R/\text{\$}$
1	OPF	127.5	37.5	45	2814.4	42.839
2	PSCOPF	52.41	127.15	50.44	3120.1	0
3	CSCOPF	89.34	75.66	45	2872.2	35.521
4	本文	118.7	46.3	45	2824.1	35.521

由上述几种方式的结果分析可得:方式1(OPF)调度的目标函数值最小,即运行成本最低;而方式2(PSCOPF)调度的目标函数值较差,即运行成本最高;其余的运行成本在二者之间.就风险水平而言,方式2(PSCOPF)风险最小(遵循“N-1”原则),为0;由于方式3和方式4的目标函数均是追求运行成本和风险值之和的最小,在不同的条件下,其风险值各不相同.

为了进一步分析各种测试结果的安全性,以输电线路L2故障为例,对该状态下的线路载荷率进行分析.为方便观察,以输电元件载荷率超过90%为界比较各个运行方式下的安全水平.方式2考虑“N-0”安全,不进行对比,所得结果如表2所示,其中  $T_1$ 、 $T_3$  分别指输电元件1、3的有功载荷率.

表2 不同调度方案的安全性分析

方式	输电元件载荷率	
	故障后	校正控制后
1	$T_1 = 1.72, T_3 = 1.06$	—
3	$T_1 = 1.70, T_3 = 1.03$	$T_1 = 1.0$
4	$T_1 = 1.70, T_3 = 1.03$	$T_1 = 1.0$

分析表2可见:方式1调度出现过载,安全水平最低;方式3由于考虑了预想事故集对应的约束,载荷率虽高,但没出现过载,电网安全水平得到相应的加强;方式3和方式4这两种调度方式都考虑了预想事故集对应的约束,通过安全校正可维持事故后电网的运行安全.

表3 方式4下部分故障的校正控制策略

故障	$P_{G1}^0/\text{MV}$	$P_{G1}^k/\text{MV}$	$P_{G2}^0/\text{MV}$	$P_{G2}^k/\text{MV}$	$P_{G3}^0/\text{MV}$
2	105.6	96.6	79.34	33.41	45
3	105.6	109.13	79.34	20.87	45
5	105.6	127	79.34	16.3	45

故障	$P_{G3}^k/\text{MV}$	$C_1^k/\text{MV}$	$C_2^k/\text{MV}$	$C_3^k/\text{MV}$
2	80	0	0	0
3	80	0	0	0
5	61.24	1.83	0	0

表3为按照方式4得出的部分校正控制方案.其中:  $P_{G1}^0$ 、 $P_{G1}^k$  分别为线路故障前后发电机G1的有功输出,发电机G2和G3对应数据类似;  $C_1^k$ 、 $C_2^k$ 、 $C_3^k$  为负荷L1、L2、L3的切负荷量.不同的故障有着不同的控制措施,输电元件2或3故障后,只需要调整发电机组出力即可保证稳定运行;而故障5发生后,还需切除部分负荷才能保证系统的安全稳定运行.

### 4 结论

本文将运行风险应用于预防控制和校正控制的协调问题中,提出一种新的预防-校正协调控制策略,

并建立了预防-校正协调控制模型. 为了快速、便利地处理所建模型, 引入二层规划模型的概念将该模型进行分解, 形成了若干小型易解的优化问题. 最后采用一种结合粒子群算法和内点法的混合方法进行求解. 算例分析表明, 该控制策略通过协调预防控制和校正控制的风险, 使得其经济性和运行风险的综合性能优于传统的安全约束调度方法. 二层规划模型的引入在有效求解该预防-校正协调控制问题的同时, 有利于将其应用于并行计算技术以加快计算的速度.

#### 参考文献(References)

- [1] Andreas V N, Anastasios G B. Stochastic scheduling of hybrid power stations in insular power systems with high wind penetration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2016, 31(5): 3424-3436.
- [2] Liu Y, Chanan S, A methodology for evaluation of hurricane impact on composite power system reliability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 145-152.
- [3] Wang A S, Luo Y, Tu G Y, et al. Quantitative evaluation of human-reliability based on fuzzy-clonal selection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 60(3): 517-527.
- [4] Abbas R, Alireza S, Andrew K. Risk-averse preventive voltage control of ac/dc power systems including wind power generation[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1494-1505.
- [5] Yang J, Li Y, Sun Q Y, et al. Online safety control decision-making optimization based on operation risk of grid operation[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1092-1093: 467-470.
- [6] 刘若溪, 张建华, 刘文霞, 等. 发电系统运行风险的评估算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 33(31): 134-141. (Liu R X, Zhang J H, Liu W X, et al. Method of operational risk assessment for generating system[J]. Proc of the CSEE, 2011, 33(31): 134-141.)
- [7] Yang J, Wang X Y, Sun Q Y. A multi-agent technology based predictive control strategy in cascading failures of large power grids[C]. Proc of the Chinese Automation Congress. Changsha: CAA, 2013: 900-905.
- [8] Wang A S, Luo Y, Tu G Y, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 442-450.
- [9] 巫伟南, 杨军, 胡文平, 等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 129-134. (Wu W N, Yang J, Hu W P, et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 129-134.)
- [10] 周晓宁, 李碧君, 刘强, 等. 遵循安全稳定导则的电网运行安全风险在线控制决策探讨[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 45-51. (Zhou X N, Li B J, Liu Q, et al. Discussion on on-line control decision-making based on operation risk analysis complying with guide on security and stability for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 45-51.)
- [11] 李明, 郭志红, 韩学山, 等. 计及输电元件实时运行态势的电网运行风险决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 88-93. (Li M, Guo Z H, Han X S, et al. Power grid risk-based decision-making considering real-time operation situation of transmission component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 88-93.)
- [12] 邱威, 张建华, 刘念, 等. 计及运行风险的多目标发电优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 64-72. (Qiu W, Zhang J H, Liu N, et al. Multi-objective optimal generation dispatch with consideration of operation risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 64-72.)
- [13] 文云峰, 江宇飞, 沈策, 等. 多阶段协调的风险调度模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 153-160. (Wen Y F, Jiang Y F, Shen C, et al. Research on the model and algorithm of multistage coordinated risk-based dispatch[J]. Proc of the CSEE, 2014, 34(1): 153-160.)
- [14] 张建雄, 唐万生. 分段线性系统最优控制设计的一种混合算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 451-454. (Zhang J X, Tang W S. A mixed algorithm for optimal control of piecewise linear systems[J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 451-454.)
- [15] Benidris M, Elsaiah S, Mitra J. Power system reliability evaluation using a state space classification technique and particle swarm optimisation search method[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1865-1873.
- [16] Ni M, McCalley D J, Vittal V, et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.
- [17] Kariula K K, Allan R N. Evaluation of reliability worth and value of lost load[J]. IEE Proc — Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(2): 171-180.
- [18] Li W, Korczynski J K. Risk evaluation of transmission system operation modes and its application at British Columbia Transmission Corporation[J]. IEE Proc — Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(1): 658-663.
- [19] 刘佳, 李丹, 高立群, 等. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 22-28. (Liu J, Li D, Gao L Q, et al. Vector evaluated adaptive particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Proc of the CSEE, 2008, 28(31): 22-28.)