

电力系统静态安全混合控制方法

傅 旭

(西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 提出一种将预防控制和校正控制相协调的电力系统静态安全混合控制方法。预防控制模块中, 利用风险指标确定进入预防控制模块的预想故障集, 该风险指标考虑了预想故障发生的概率及其严重性, 采用连续线性规划技术求解考虑多预想故障的静态安全预防控制策略。校正控制模块中, 首先判断系统静态安全裕度是否满足要求, 并考虑风电/光伏的随机波动特性, 针对不安全故障分别制定校正控制策略。所提方法通过系统风险指标协调预防控制和校正控制中考虑的预想故障集, 从而将预防控制和校正控制相互协调, 以获得安全性和经济性均满足系统需求的静态安全控制策略。以我国某 682 节点系统的算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力系统; 静态安全分析; 预防控制; 校正控制; 负荷裕度

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.020

0 引言

电力系统的安全运行一直是电力工作者的关注焦点和研究热点^[1-6], 对系统进行在线监视, 当发现系统存在潜在不安全因素时采取相应的控制措施十分重要。为了保证系统安全运行, 一般要求满足 $N-1$ 原则, 当系统不满足 $N-1$ 原则时, 需要采取预防或校正控制措施以保证系统的安全性^[7]。文献[8]提出一种快速分析系统断线后系统状态变量变化情况的灵敏度分析方法, 大幅加快了计算速度。文献[9]通过采用二阶灵敏度求解线性规划最优潮流的问题。文献[10]提出一种基于连续线性规划技术的多预想故障的静态电压稳定预防控制方法。文献[11]通过选取最不利的负荷波动模式并加入校正控制模型从而考虑了负荷的随机波动特性。文献[12]提出一种静态安全分析中快速计算系统最大负荷能力的增广潮流法。文献[13]提出广义负荷裕度概念, 给出一种统一考虑故障和负荷裕度约束的电力系统静态安全预防控制算法。文献[14]提出一种考虑预想故障发生概率及负荷水平波动的静态安全预防控制方法。文献[15]对估计支路故障后的系统静态电压稳定裕度进行有益的探索, 提高了计算精度。文献[16]对电网安全态势的评估进行系统的分析和总结, 提出包含初步评估和精确计算 2 个步骤的电网运行态势实时评估方法。近年来, 随着风电/光伏等新能源在电力系统中的规模逐渐扩大, 其出力的随机性给电力系统的安全控制带来了新的问题^[17-18]。

总体而言, 目前电力系统的静态安全控制方法

有 2 类: 一类是确定性的方法, 即保证预想故障集下系统静态安全, 其分析结果一般比较保守^[20]; 另一类是基于风险评估的方法, 该方法定量地考虑了事故的可能性和严重性这 2 个重要因素, 是确定性方法的有力补充^[21-22]。在电力系统实际运行过程中, 由于负荷和新能源发电(风电或光伏)出力的随机波动、系统其他不确定因素的影响等, 系统在当前时刻不但应是静态安全的, 而且还应具有一定的静态安全裕度。

对此, 本文提出一种将预防控制和校正控制相协调的电力系统静态安全混合控制方法。在预防控制模块中, 利用风险指标确定进入预防控制模块的预想故障集, 该风险指标考虑了预想故障发生的概率及其严重性, 采用连续线性规划技术求解考虑多预想故障的静态安全预防性控制策略。在校正控制模块中, 首先判断系统静态安全裕度是否满足要求, 并考虑风电/光伏随机波动对安全裕度的影响, 针对不安全故障分别制定校正控制策略。该方法通过系统风险指标协调预防控制和校正控制中考虑的预想故障集, 从而将预防控制和校正控制相互协调, 以获得安全性和经济性均满足系统需求的静态安全控制策略。我国某 682 节点的实际系统的仿真算例表明了本文所提方法的有效性及其简单、易行的特点。

1 总体思路和基本流程

本文方法总体思路如下。

(1) 将预防控制和校正控制相协调, 为了考虑预想故障发生的概率和其严重性, 利用风险指标确定进入预防控制模块的预想故障集, 而对于预想故障集中没有考虑的不安全故障和静态安全裕度不满足要求的情况, 则采用校正控制予以考虑。

(2) 实际运行过程中, 在实施预防控制时, 如果

预防控制代价不为调度运行人员接受,而实施预防控制后的系统风险是较低的,则可适当提高系统预防控制模块中选择预想故障的系统风险指标阈值,从而将一些故障调整到校正控制模块中加以考虑,以获得安全性和经济性均能满足实际系统需求的电力系统静态安全预防和校正控制策略。

总之,本文所提电力系统静态安全混合控制算法能灵活针对各种预想故障实施预防控制,结合预防控制代价以及预防控制后系统的静态安全风险指标,能为运行调度人员制定合理的静态安全控制策略提供参考依据。

本文所提方法的计算流程如图 1 所示。主要步骤如下:

- a. 在当前工况下,对系统进行预想故障集下的静态安全性分析(框①);
- b. 若不满足静态安全要求,则进入预防控制子模块(框③),预防控制子模块针对当前工况下的不安全预想故障进行预防控制;
- c. 确定系统 $N-1$ 静态安全约束下的负荷裕度,并考虑风电/光伏出力的随机波动(框④),据此判断系统静态安全裕度是否满足要求(框⑤);
- d. 若存在不安全的预想故障,则对不安全预想故障制定校正控制策略(框⑥);
- e. 判断预防控制代价是否可接受(框⑧),若控制代价过高,则调整预防控制模块中预想故障选择的阈值(具体调整方法见 2.2 节),将部分故障转移至校正控制模型加以考虑(框⑨),然后重新进行预防控制子模块的计算。

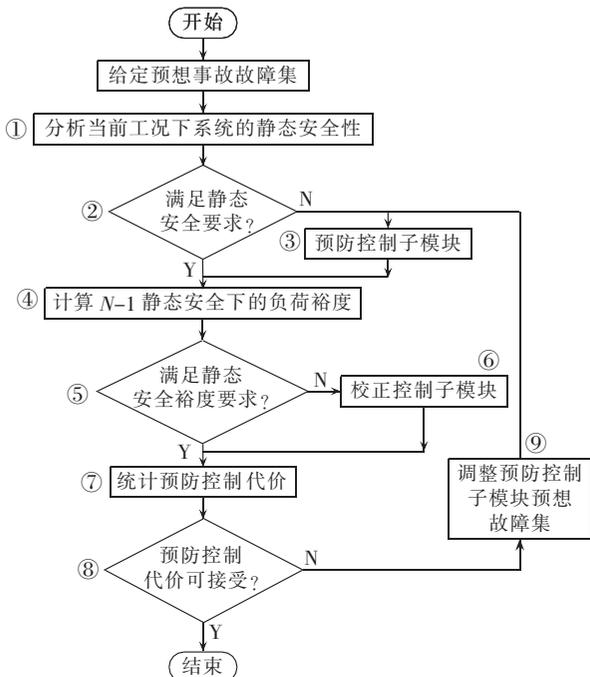


图 1 计算流程

Fig.1 Flowchart of algorithm

2 $N-1$ 检验和预防控制

2.1 基于灵敏度分析的 $N-1$ 检验

正常情况下系统潮流方程为:

$$W_0 = f(X_0, Y_0) \quad (1)$$

其中, W_0 为节点注入功率; X_0 为系统状态变量, 即节点电压和相角; Y_0 为系统导纳参数。

系统发生断线后节点电压的变化量为^[8]:

$$\Delta X = S_0(I + L_0 S_0)^{-1} \Delta W_l \quad (2)$$

其中, $\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix}$ 为节点电压和相角的变化量; I 为单位矩阵; $S_0 = J_0^{-1}$ 为灵敏度矩阵, 是潮流雅可比矩阵 J_0 的逆矩阵; $\Delta W_l, L_0$ 的表达式如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \Delta W_l &= -f'_y(X_0 + Y_0) \Delta Y \\ L_0 &= f''_{xy}(X_0 + Y_0) \Delta Y \end{aligned} \quad (3)$$

其中, ΔY 为断线支路导纳; f'_y 为节点功率方程对网络参数 Y_0 的一阶导数; f''_{xy} 为节点功率方程对系统状态向量 X_0 和网络参数 Y_0 的二阶导数。 L_0 和 ΔW_l 中只有与断线节点相关联的元素才是非零元素, 具体表达式见文献[8]。

支路 $k-m$ 的视在功率幅值为:

$$S_{km} = \sqrt{P_{km}^2 + Q_{km}^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{km} &= U_k U_m Y_{km} \cos(\theta_{km} + \delta_m - \delta_k) - U_k^2 Y_{km} \cos \theta_{km} \\ Q_{km} &= -U_k U_m Y_{km} \sin(\theta_{km} + \delta_m - \delta_k) + U_k^2 Y_{km} \sin \theta_{km} - \frac{U_k^2 Y_{sh}}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, P_{km} 和 Q_{km} 的分别为有功功率和无功功率; Y_{km} 为线路 $k-m$ 的导纳幅值; θ_{km} 为线路 $k-m$ 的导纳角度; δ_m 为节点 m 的相角; δ_k 为节点 k 的相角; Y_{sh} 为线路 $k-m$ 的容纳。

将式(4)写成增量形式:

$$\Delta S_{km} = J_L \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J_L \Delta X \quad (6)$$

其中, J_L 为支路功率变化灵敏度矩阵, 可由式(5)求出。

将式(2)代入式(6)可得断线后任意支路 $k-m$ 的功率变化量为:

$$\Delta S_{km} = J_L S_0 (I + L_0 S_0)^{-1} \Delta W_l \quad (7)$$

根据式(2)、(7)可以对断线后系统的线路功率和节点电压是否越限进行分析。

2.2 预想故障集的确定

制定考虑多预想故障集的静态安全预防控制策略时, 不同预想故障所对应的静态安全预防控制代价和系统安全性也不同。当预防控制代价过高不为运行人员接受时, 可调整预防控制模型中预想故障集的故障数目, 如图 1 中的框⑨所示。因此, 如何选择预防控制模型中预想故障的数目是协调预防控制和校正控制的一个重要步骤。

本文利用风险指标来分析预想故障所发生的概率及其严重性,从而确定预防控制模型中需要考虑的预想故障集。风险指标的计算方法可参考文献[19]。对于低电压风险指标,用母线电压幅值与额定电压的比值 u 来描述,电压越低则后果越严重;对于线路过载风险指标,用线路潮流与输送容量热极限的比值 R 来描述。2 个风险指标的严重度函数的定义如图 2 所示。

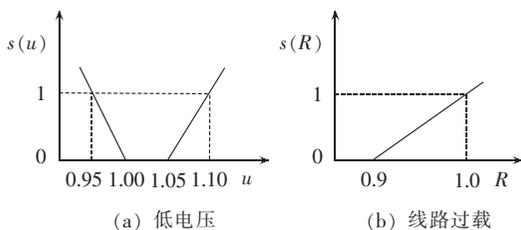


图 2 严重度函数

Fig.2 Severity functions

以线路过载为例,假设第 i 个关键预想故障发生的概率为 p_i ,则其线路过载风险指标 C_{Ri} 见式(8)。

$$C_{Ri} = p_i \sum_{j \in T_R} s(R_j) \quad (8)$$

其中, T_R 为线路 i 断开后系统过载线路的集合。

类似地,可得到电压越限风险指标 C_{ui} 如下:

$$C_{ui} = p_i \sum_{j \in T_U} s(u_j) \quad (9)$$

其中, T_U 为线路 i 断开后系统低电压节点集合。

本文通过设定线路过载风险和节点低电压风险指标的阈值 C_{Rth} 和 C_{uth} 来选择参与预防控制的预想故障集,即将导致系统风险指标大于阈值值的预想故障加入预防控制模型。在实际应用时,系统风险指标阈值值的取值不一样,就可以得到不同的预想故障集,进而制定出不同的预防控制策略。

2.3 预防控制模型

本文采用逐次线性规划^[13-14]来求解预防控制模型,其预防控制的线性规划模型如下:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^N c_i \Delta P_i \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial S_{L(m)}^l}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial S_{L(m)}^l}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \leq S_{L(m)}^l - S_{L(m)}^{\max} \\ & \quad m = 1, 2, \dots, N_L; m \neq l; l = 1, 2, \dots, L \\ & \quad \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial U_j^l}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial U_j^l}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \leq U_j^{\max} - U_j^l \\ & \quad \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial U_j^l}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial U_j^l}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \geq U_j^{\min} - U_j^l \\ & \quad j = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, L \\ & \quad \sum_{i=1}^N \Delta P_i = 0 \\ & \quad \Delta P_i^{\min} \leq \Delta P_i \leq \Delta P_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_c \\ & \quad \Delta Q_i^{\min} \leq \Delta Q_i \leq \Delta Q_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_c \end{aligned} \quad (10)$$

其中, c_i 为控制变量 i 的权系数,本文中考虑为发电机调整出力的单位价格和切负荷的单位价格; L 为预想的断线支路总数; N 为系统节点总数; N_c 为参与控制的节点总数; N_L 为系统支路总数; $S_{L(m)}^l$ 、 U_j^l 分别为支路 l 断线条件下支路 m 的视在功率和节点 j 的电压幅值; $S_{L(m)}^{\max}$ 、 U_j^{\max} 、 U_j^{\min} 分别为支路 m 的视在功率最大值和节点 j 的电压幅值的上、下限; ΔP_i^{\max} 、 ΔP_i^{\min} 分别为有功控制变量的上、下限; ΔQ_i^{\max} 、 ΔQ_i^{\min} 分别为无功控制变量的上、下限; $\frac{\partial S_{L(m)}^l}{\partial P_i}$ 、 $\frac{\partial S_{L(m)}^l}{\partial Q_i}$ 分别为支路 m 的视在功率幅值对控制节点 i 有功、无功扰动的灵敏度; $\frac{\partial U_j^l}{\partial P_i}$ 、 $\frac{\partial U_j^l}{\partial Q_i}$ 分别为节点 j 电压幅值对节点 i 有功、无功扰动的灵敏度; $\sum_{i=1}^N \Delta P_i = 0$ 为有功功率平衡约束。

3 校正控制模型

3.1 负荷裕度计算方法

如图 1 所示的预防控制策略制定后,校核系统在正常运行状态以及预想故障状态下是否满足静态安全裕度约束,即系统在一定的负荷增长方向和发电机出力增长方向上的负荷裕度是否大于某一阈值。数学上表现为系统在满足静态安全约束的情况下,要求反映负荷和发电机出力增加的参数 $\lambda \geq \lambda_c$,其中 λ_c 为系统的静态安全裕度(也可以称为负荷裕度)^[12-13],在电力系统在线静态安全监控中, λ_c 和系统发电机及负荷增长方向可根据实际需要来确定,如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} P_G^0 - P_D^0 \\ Q_G^0 - Q_D^0 \end{bmatrix} + \lambda_c \begin{bmatrix} K_{GP} - K_{DP} \\ -K_{DQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P(X) \\ Q(X) \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

其中, λ_c 为系统静态安全裕度; P_G^0 为当前发电机有功出力向量; Q_G^0 为当前发电机无功出力向量; P_D^0 为当前有功负荷向量; Q_D^0 为当前无功负荷向量; K_{GP} 为当前发电机有功出力增加方向; K_{DP} 为有功负荷增加方向向量; K_{DQ} 为无功负荷增加方向向量; $P(X)$ 为有功潮流方程向量; $Q(X)$ 为无功潮流方程向量。

由于系统需要考虑的故障数目庞大,若逐一分析每条支路断线后系统的最大负荷能力,计算量必将十分庞大。实际上在众多的断线事故中,必定有一条断线支路对应的系统静态安全裕度最小,如果将此故障预先找出来,那么只需要针对此断线故障计算系统的静态安全裕度即可,这将大幅减少计算量。基于此思想,文献[12-14]提出了一种快速计算系统 $N-1$ 静态安全约束下静态安全裕度的方法,本文采用此方法来快速计算系统的静态安全裕度。

3.2 新能源出力波动的考虑

对于风电/光伏等出力随机波动的电源而言,准

确预测其下一时刻的出力有较大困难,但估计其波动范围则较为容易,因此本文采用式(12)描述其波动。

$$P_{j,\min} \leq P_j \leq P_{j,\max} \quad (12)$$

其中, P_j 为节点 j 的风电/光伏出力; $P_{j,\max}$ 为节点 j 的风电/光伏输出的最大值; $P_{j,\min}$ 为节点 j 的风电/光伏输出的最小值。

首先在不考虑风电/光伏出力波动的情况下,计算其负荷裕度;然后在负荷裕度处,计算风电/光伏出力波动对负荷裕度的灵敏度,其发电输出的增长方向可采取较为严重的方式^[11],并更新负荷裕度。图 3 为负荷裕度的计算流程。

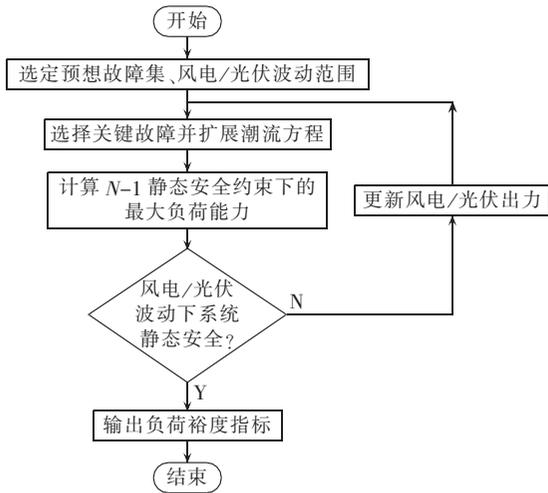


图 3 负荷裕度计算流程

Fig.3 Flowchart of load margin calculation

3.3 基于连续线性规划的校正控制模型

本文针对不满足静态安全裕度的预想故障制定校正控制策略,模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^{N_c} c_i \Delta P_i \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^{N_c} \left(\frac{\partial S_{L(m)}^l}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial S_{L(m)}^l}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \leq S_{L(m)}^l - S_{L(m)}^{\max} \\ & m=1,2,\dots,N_L; m \neq l; l=1,2,\dots,L \\ & U_j^{\min} - U_j \leq \sum_{i=1}^{N_c} \left(\frac{\partial U_j}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial U_j}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \leq U_j^{\max} - U_j \\ & j=1,2,\dots,N \\ & \sum_{i=1}^{N_c} \left(\frac{\partial \lambda^l}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial \lambda^l}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \geq \lambda_c - \lambda_0 \\ & l=1,2,\dots,L \\ & \sum_{i=1}^{N_c} \Delta P_i = 0 \\ & \Delta P_i^{\min} \leq \Delta P_i \leq \Delta P_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,N_c \\ & \Delta Q_i^{\min} \leq \Delta Q_i \leq \Delta Q_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,N_c \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\frac{\partial \lambda^l}{\partial P_i}$ 、 $\frac{\partial \lambda^l}{\partial Q_i}$ 分别为支路 l 断开后系统负荷裕度对控制节点 i 有功、无功扰动的灵敏度;其余变量的含义与式(10)相同。

本文中校正控制模块与预防控制模块的不同之处如下。

(1)校正控制针对的是静态安全裕度不足或预防控制模型中没有考虑的预想故障。

(2)校正控制需对每一个预防控制模型中没有考虑的不安全预想故障分别给出校正控制策略。

(3)系统运行过程中,校正控制中考虑的故障实际发生时才执行预先制定好的校正控制策略;而预防控制只要发现潜在的不安全因素,即执行预防控制策略。

4 仿真分析

4.1 算例描述

以我国某实际系统为仿真算例,验证本文方法的有效性。该系统的主网架地理接线示意图如图 4 所示。计算的潮流数据中,总有功负荷为 21039 MW,总无功负荷为 8420 Mvar,包含节点 682 个、支路 973 条。系统潮流呈现东电西送、南电北送态势。计算中的边界条件取为:计算中考虑 510 个 $N-1$ 断线故障;系统要求的负荷裕度为 10%;系统中风电出力为 5000 MW,风电出力的波动范围为当前出力的 $\pm 10\%$,即风电出力的波动范围为 $[4500, 5500]$ MW。为了便于与传统方法进行比较,本算例中分 4 种情况分析。

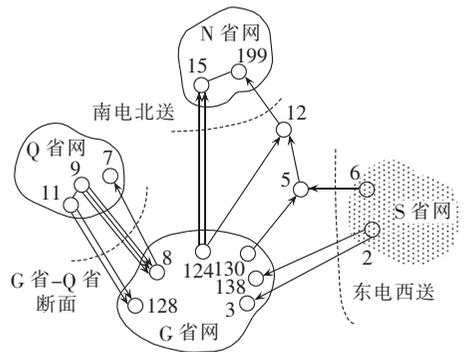


图 4 电网接线示意图

Fig.4 Schematic diagram of power grid

情况 1:对当前状态不安全的预想故障采用预防控制,即预想故障集选择的门槛值按 0 考虑;而对于静态安全裕度不满足要求的预想故障,则采取校正控制。

情况 2:预防控制模块中预想故障集选择的门槛值按 0.02 考虑,即将情况 1 中部分预想故障放入校正控制模型中加以考虑。

情况 3:只考虑采用预防控制,而不考虑采用校正控制,即预防控制的目标是使系统既满足静态安全约束,也满足静态安全裕度约束。

情况 4:在情况 1 的基础上,将风电出力的波动范围提高至当前出力的 $\pm 20\%$,即风电出力范围为 $[4000, 6000]$ MW。

4.2 计算结果

(1)情况 1。

预防控制模块中,选取预想故障集的系统风险门槛值按 0 考虑,即只要该线路断线后系统不满足静态安全约束,则该断线故障就进入预想故障集。进入预防控制模块的预想故障集中的断线故障为 75 个,预防控制策略如表 1 所示(表中切负荷量和发电机调整量均为标么值,后同),合计切负荷量 7.026 p.u.。施加预防控制后,计算出系统的负荷裕度为 104.65% 基荷,小于系统要求的 110% 基荷的裕度。针对不安全故障分别制定校正控制策略,如表 2 所示。

表 1 情况 1 的预防控制策略

Table 1 Preventive control strategy for Case 1

节点	切负荷量	节点	发电机调整量
89	0.057	355	-0.014
150	0.492	359	-1.600
154	0.189	360	-1.600
352	0.007	361	-2.202
353	0.007	395	-0.358
554	0.975	396	-0.544
572	0.139	148	-0.708
580	2.360		
590	2.800		

表 2 情况 1 的校正控制策略

Table 2 Corrective control strategy for Case 1

断线支路	切负荷		发电机调整	
	节点	切负荷量	节点	调整量
159-160	598	0.31	355	-0.380
	600	0.40	318	-0.330
155-159	598	0.27	355	-0.349
	600	0.35	318	-0.271
160-164	600	0.40	355	-0.400

对于该实际系统,在主频 2.0 G 的 Pentium PC 机上运行,计算时间如表 3 所示。

表 3 所提方法的计算时间

Table 3 Calculation time of proposed method

过程	计算时间/s
预防控制	0.981
计算负荷能力	0.183
校正控制	0.810
总耗时	1.974

(2)情况 2。

实际运行中,若预防控制的代价不为运行调度人员所接受,则在制定预防控制策略时,可适当提高预想故障集合选择的系统风险门槛值,从而将部分预想故障放到校正控制策略的制定中考虑。因此,本算例中将预想故障集的系统风险门槛值提高至 0.02,则制定预防控制策略时选取的预想故障数目减少至 30 个,预防控制策略如表 4 所示。可以看出,由于预防控制中考虑的预想故障数目减少,预防控制策略发生变化,预防控制代价降低至 1.36 p.u.。

表 4 情况 2 的预防控制策略

Table 4 Preventive control strategy for Case 2

节点	切负荷量	节点	发电机调整量
89	0.057	355	0.014
150	0.285	359	-0.550
154	0.089	360	-0.638
352	0.007	395	0.358
353	0.047	396	-0.544
554	0.875		

施加预防控制后,计算出系统最大负荷能力为 102.35% 基荷,小于系统要求的 110% 基荷,故分别针对不安全故障制定校正控制策略,如表 5 所示。可以看出,虽然情况 2 的预防控制策略的控制代价降低了,但校正控制中需要计及的故障数目增加,即校正控制代价提高了。

表 5 情况 2 的校正控制策略

Table 5 Corrective control strategy for Case 2

断线支路	切负荷		发电机调整	
	节点	切负荷量	节点	调整量
159-160	598	0.51	598	-0.61
	600	0.40	600	-0.30
155-159	598	0.31	598	-0.41
	600	0.45	600	-0.37
160-164	600	0.40	598	-0.21
			600	-0.19
189-176	300	0.25	252	-0.21
	207	0.62	636	-0.66
125-159	300	0.77	152	-0.42
	207	0.11	236	-0.46
160-182	125	0.37	132	-0.32
	258	0.16	286	-0.21
136-218	121	0.99	232	-0.72
			186	-0.27

图 5 为预防控制代价和系统静态安全风险指标选择的门槛值之间的关系,图中预防控制代价为标么值。随着系统风险指标的门槛值的增加,进入预防控制的预想故障数目减少,从而预防控制代价降低。

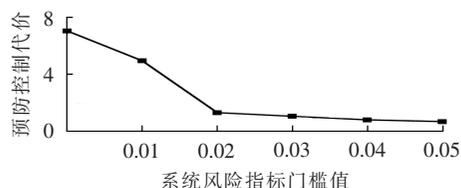


图 5 静态安全预防控制代价与系统风险关系
Fig.5 Relationship between cost of preventive static security control and system risk

(3)情况 3。

在情况 3 中,只考虑采用预防控制使系统既满足静态安全约束,也满足静态安全裕度约束。预防控制如表 6 所示,合计切负荷量为 21.711 p.u.。可以看出,由于需要保证系统在当前时刻既满足静态安全约束,也需要保证具有 110% 基荷的负荷裕度约束,因

表 6 情况 3 的预防控制策略

Table 6 Preventive control strategy for Case 3

节点		切负荷量		节点		发电机调整量	
89	0.064	355	-0.514	359	-1.990	360	-2.365
150	0.542	361	-3.012	395	-1.253	396	-2.369
154	0.300	301	-1.098	152	-2.055	148	-1.050
352	1.077	148	-1.050	198	-2.784	211	-2.002
353	2.069	198	-2.784	211	-2.002	177	-1.219
554	0.958	177	-1.219				
572	0.422						
580	2.378						
590	3.012						
264	2.569						
268	3.892						
428	1.985						
504	2.443						

此,预防控制代价明显高于情况 1 和情况 2。

通过上述 3 种情况的算例分析可以看出,本文算法中选择预想故障集的风险门槛值不同,则参与预防控制的故障个数也不同,即提高预想故障选择的风险门槛值后,可将一部分预想故障转移至校正控制模型中加以考虑,从而降低了预防控制的代价,达到协调预防控制和校正控制的目的。

(4)情况 4。

该情况下风电出力的波动范围提高至[4 000, 6000] MW。为与情况 1 对比,选取进入预防控制的预想故障集不变,则其预防控制策略不变,但由于在校正控制中需要考虑风电/光伏的随机波动,其校正控制策略将发生较大的变化,控制代价也将增加。情况 4 的校正控制策略如表 7 所示。因此,准确地预测风电/光伏出力波动范围,对于降低系统静态安全控制代价具有较大意义。

表 7 情况 4 的校正控制策略

Table 7 Corrective control strategy for Case 4

断线支路	切负荷		发电机调整	
	节点	切负荷量	节点	调整量
159-160	598	0.65	598	-0.61
	600	0.40	600	-0.44
155-159	598	0.32	598	-0.42
	600	0.51	600	-0.41
160-164	600	0.51	598	-0.31
			600	-0.20
189-176	300	0.28	252	-0.21
	207	0.69	636	-0.76
125-159	300	0.79	152	-0.64
	207	0.31	236	-0.46
160-182	125	0.58	132	-0.32
	258	0.16	286	-0.42
136-218	121	1.04	232	-0.77
			186	-0.27
136-225	182	1.29	232	-0.92
			186	-0.37

5 结论

本文提出一种考虑预防控制和校正控制相结合的电力系统静态安全混合控制方法,具有如下特点。

a. 利用系统静态安全风险指标以及预防控制代价调整预防控制和校正控制策略中需要考虑的预想故障范围,可以为调度运行人员提高灵活性。

b. 给出了系统预想故障下的静态安全裕度。利用扩展潮流方程,可快速计算出静态安全约束下的电力系统静态安全裕度,避免了计算量过大的问题。

c. 既保证当前负荷水平下的静态安全,又考虑了负荷、新能源出力波动以及电力系统静态安全裕度需求。

我国某实际 682 节点系统的算例表明,所提方法简单有效,可为电网安全经济运行提供决策支持。

参考文献:

- [1] 刘明波,夏岩,吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):28-33.
LIU Mingbo,XIA Yan,WU Jie. Calculation of available transfer capability with transient stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):28-33.
- [2] 王锡凡. 电力市场条件下电网的安全保证体系[J]. 电网技术,2004,28(9):7-13.
WANG Xifan. Electric network security setup in electricity market environment[J]. Power System Technology,2004,28(9):7-13.
- [3] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术,2003,27(9):T2-T6.
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. Power System Technology,2003,27(9):T2-T6.
- [4] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术,2004,28(9):1-6.
HAN Zhenxiang,CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology,2004,28(9):1-6.
- [5] 印永华,郭建波,赵建军,等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-11.
YIN Yonghua,GUO Jianbo,ZHAO Jianjun,et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology,2003,27(10):8-11.
- [6] 赵希正. 强化电网安全保障可靠供电——美加“8.14”停电事件给我们的启示[J]. 电网技术,2003,27(10):1-7.
ZHAO Xizheng. Strengthen power system security to ensure reliable power delivery[J]. Power System Technology,2003,27(10):1-7.
- [7] 杨以涵,张东英,马骞,等. 大电网安全防护体系的基础研究[J]. 电网技术,2004,28(9):23-27.
YANG Yihan,ZHANG Dongying,MA Qian,et al. Study on the architecture of security and defense system of large-scale power grid[J]. Power System Technology,2004,28(9):23-27.
- [8] 王锡凡,王秀丽. 实用电力系统静态安全分析[J]. 西安交通大学

- 学报,1988,22(1):25-36.
- WANG Xifan,WANG Xiuli. Practical contingency analysis of power systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,1988,22(1):25-36.
- [9] OLOFSSON M,ANDERSSON G,SODER L. Linear programming based optimal power flow using second order sensitivities [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1995,10(3):1691-1697.
- [10] CAPITANESCU F,CUTSEM T V. Preventive control of voltage security margins:a multicontingency sensitivity-based approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(2):358-364.
- [11] 傅旭,王锡凡. 考虑负荷随机特性的静态安全校正控制算法[J]. 电工技术学报,2008,23(1):114-119.
- FU Xu,WANG Xifan. A corrective control method considering load stochastic characteristic[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2008,23(1):114-119.
- [12] 傅旭,王锡凡,解利斌. 考虑 $N-1$ 静态安全的电力系统最大负荷能力算法[J]. 电网技术,2006,30(6):6-10.
- FU Xu,WANG Xifan,XIE Libin. A new method of calculating maximum loadability of power system considering $N-1$ static security[J]. Power System Technology,2006,30(6):6-10.
- [13] FU Xu,WANG Xifan. Unified preventive control approach considering voltage instability and thermaloverload[J]. IET Generation Transmission and Distribution,2007,1(6):864-871.
- [14] 傅旭. 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):120-124.
- FU Xu. Static security preventive control considering uncertainty factors for power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):120-124.
- [15] 熊宁,蔡恒,程虹. 支路故障后静态电压稳定裕度的估算[J]. 电网技术,2012,36(9):151-154.
- XIONG Ning,CAI Heng,CHENG Hong. A method to estimate static voltage stability margin after branch outage[J]. Power System Technology,2012,36(9):151-154.
- [16] 王斌琪,王海霞,徐鹏,等. 电网运行趋势实时安全评估方法[J]. 电网技术,2015,39(2):478-485.
- WANG Binqi,WANG Haixia,XU Peng,et al. Real-time security assessment methods of power grid operation trends[J]. Power System Technology,2015,39(2):478-485.
- [17] 汤奕,赵丽莉,郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):34-40.
- TANG Yi,ZHAO Lili,GUO Xiaojiang. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(20):34-40.
- [18] 张明理,徐建源,李佳珏. 含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J]. 电网技术,2013,37(3):740-745.
- ZHANG Mingli,XU Jianyuan,LI Jiajue. Research on transient stability of sending power grid containing high proportion of wind power[J]. Power System Technology,2013,37(3):740-745.
- [19] NI M,MCCALLEY J D,VITTAL V,et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,18(1):258-265.
- [20] 吴子美,刘东,周韩. 基于风险的电力系统安全预警的预防控制性控制决策分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):105-108.
- WU Zimei,LIU Dong,ZHOU Han. Preventive control decision making based on risk analysis for power system security warning[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):105-108.
- [21] 卢秀琼,颜伟,余娟,等. 静态电压稳定预防控制的风险评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):65-70,97.
- HU Xiuqiong,YAN Wei,YU Juan,et al. Risk assessment for preventive control of static voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):65-70,97.
- [22] 付蓉,蒋国平,王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(3):12-17.
- FU Rong,JIANG Guoping,WANG Baoyun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk [J]. Power System Protection and Control,2011,39(3):12-17.

作者简介:



傅旭(1976—),男,辽宁凌海人,高级工程师,博士,从事电力系统规划分析方面的研究工作(E-mail:fuxu@nwepdi.com)。

Hybrid control of power system static security

FU Xu

(Northwest Electric Power Design Institute Co.,Ltd.,Xi'an 710075,China)

Abstract: A hybrid control method for the static security of power system is proposed to coordinate the preventive control with the corrective control. In the preventive control module,a system risk index is applied to determine the contingency sets,which considers the occurrence probability and severity of contingencies;the continuous linear programming technique is used to solve the multi-contingency preventive control strategy of static security. In the corrective control module,the unsatisfied static security margins are detected first,and with the consideration of the random fluctuations of wind/photovoltaic power generations,a corresponding corrective control strategy is then developed for each contingency. The proposed method adopts the system risk index to coordinate the contingency sets of both preventive control and corrective control for the coordination between preventive control and corrective control to obtain a static security control strategy,which meets the requirements of power system for both security and economy. Simulative results of a practical 682-bus system verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: power systems; static security analysis; preventive control; corrective control; load margins