

输电系统动态安全风险评估与优化

余贻鑫^{①*}, 王东涛^{①②}

① 天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072;

② 天津工程师范学院自动化与电气工程学院, 天津 300222

* E-mail: yixinyu@tju.edu.cn

收稿日期: 2007-07-16; 接受日期: 2007-11-07

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50595413)和国家重点基础研究专项经费项目(批准号: 2004CB217904)资助

摘要 提出一种基于实用动态安全域的输电系统动态安全风险评估和优化模型. 在动态安全风险模型中计及了综合安全控制措施的成本和节点注入功率不确定性的影响. 应用实用动态安全域可以比较方便地计及暂态稳定约束和节点注入功率的不确定性. 给出了确定和划分预想事故集合的方法, 并以系统动态不安全风险最小为目标, 针对给出的主导预想事故集建立了一种风险控制的最优化模型. 通过对预防控制和紧急控制措施的优化以及预想控制集合的优化分解, 得到了系统动态不安全风险的最优解. 最后以 New England 10 机 39 节点系统为例验证了所提出的数学模型的有效性.

关键词

输电系统
风险评估
动态安全
实用动态安全域
综合安全控制

随着电力市场化的推进, 电力系统的风险评估的重要性越来越突出. 在市场竞争和经济利益的驱使下, 电力系统的运行状态越来越接近系统的稳定极限从而导致了系统可靠性的下降. 近年来频繁发生的严重停电事故使人们意识到, 电力工业多年来采用的 $N-1$ 准则已不足以保持系统合理的可靠性水平^[1]. 由于没有电力公司会认可电力系统 $N-2$ 或 $N-3$ 的规划原则在经济上的合理性, 因此一种可行的选择就是在电力系统规划和运行中引进风险管理, 以使系统的风险水平保持在可接受的范围之内^[2].

概率风险评估的计算方法有 Monte Carlo 模拟法^[3,4]和解析法^[5~7]两种. Monte Carlo 法可以比较方便地计及各种不确定性因素, 但需要进行大量的仿真, 特别是在进行输电系统动态风险评估时需要进行暂态稳定分析, 而电力系统暂态稳定仿真的计算量非常大. 特别是在计及节点注入功率不确定性时, 对每一个可能的运行点都要进行暂态稳定仿真, 致使该法很难应用到在线实时概率动态安全风险系统中.

在线概率安全风险系统给出的是输电系统短期内系统风险水平, 元件的故障率很小, 因此解析法的计算效率好于 Monte Carlo 法^[2]. 解析法进行输电系统动态风险评估时亦需要进行暂态稳定分析, 因而也面临较大的计算量. 文献^[5~7]建立的风险模型只计及了预想故障的不确定性, 并未计及节点注入功率等其他不确定性因素. 此外, 预防控制和紧急控制措施对系统风险有很大影响, 通过预防控制和紧急控制措施以及事故集合的合理划分可以提供最优的系统风险水平和最优的控制方案, 但目前尚未见到有关报道.

定义于注入功率空间的实用动态安全域(PDSR)把安全域表达为注入功率的线性组合的不等式约束形式^[8], 从而可以大大降低概率的安全性评估计算量, 可使一大类电力系统调度最优化问题中暂态稳定约束难以处理这一棘手的问题变得十分简易. PDSR 已被成功地应用在输电系统动态概率安全分析和优化潮流中^[9,10], 它可以通过离线计算和在线修正的方法

得到^[11]. 一旦得到了所需的PDSR, 就可以用解析法在线计算概率安全指标, 计算十分迅速.

本文提出一种基于实用动态安全域的输电系统概率动态安全风险评估与优化模型. 在该模型中不仅计及了故障发生的不确定性和节点注入功率的不确定性, 还通过对预防控制和紧急控制措施的优化以及预想控制集合的优化分解, 得到了系统动态不安全风险的最优解. 最后, 以 New England 10 机 39 节点系统为例, 检验了本文所建立模型的合理性及可行性.

1 动态安全风险评估模型

1.1 动态不安全风险的定义

根据IEEE标准^[12], 风险指标定义为概率和影响的乘积, 即系统不安全风险与预想事故发生的概率和预想事故发生后的影响成正比. 这里只研究动态不安全风险. 动态不安全风险是由于事故发生后系统失去暂态稳定产生的. 事故发生后的影响包括切机、切负荷以及系统崩溃造成的直接损失和间接损失(社会、政治影响). 动态不安全风险指标可由下式计算

$$R(y) = \sum_{E_i \in \Gamma} \Pr(\text{DIS} \cap E_i) \text{Im}(y, E_i), \quad (1)$$

式中 R 表示动态不安全风险; DIS 表示系统动态不安全; Im 表示影响; $y = y_0 + \zeta$ 为再调度后的节点有功注入向量, y_0 为再调度前的节点有功注入功率向量, ζ 为再调度功率向量; $\Pr(\text{DIS} \cap E_i)$ 为给定事件 E_i 的系统动态不安全概率; E_i 为预想事故集合中的第 i 个事故发生的事件; Γ 为预想事故集.

(1)式中的 $\Pr(\text{DIS} \cap E_i)$ 可由下式计算

$$\Pr(\text{DIS} \cap E_i) = \Pr(E_i) \Pr(\text{DIS} | E_i), \quad (2)$$

式中 $\Pr(E_i)$ 为故障事件 E_i 发生的概率; $\Pr(\text{DIS} | E_i)$ 为给定故障事件 E_i 的系统动态不安全条件概率.

(2)式中的第二项的计算, 应用超平面形式的实用动态安全域, 可以比较容易地计及节点注入功率 y 的不确定性^[9].

1.2 预想事故集合的确定

理论上, 风险安全评估的计算需要考虑每一种可能的电力网络拓扑状态. 但大电力系统存在众多的

可能情况, 例如一个有 n 个元件的电力系统可能的状态数量为 $2^n - 1$, 即会产生“维数爆炸”问题. 因此需要采取一定的方法降低需要考虑的状态数目, 针对一个预先确定的主导预想事故集进行风险评估.

本文按照故障对系统动态不安全概率的贡献作为排序指标进行排序, 将对系统不安全概率指标贡献较大的故障计入预想事故集合, 得到如下定义的主导预想事故集 Γ

$$\Gamma := \{E_i | \Pr(\text{DIS} \cap E_i) \geq \varepsilon\}, \quad (3)$$

式中 ε 为动态不安全概率截断阈值.

在线安全风险评估时, 还需要对由(3)式得到的预想事故集合 Γ 继续划分. 这里将 Γ 分为两部分, 其中一部分故障需要采取预防控制措施或紧急控制措施, 以保证该集合中的故障发生后系统是动态安全的, 这些故障构成集合 Γ_1 ; 集合 Γ 中不采取预防控制或紧急控制措施的其它故障构成集合 Γ_2 . 显然集合 Γ_1 中的故障的发生概率和故障后的动态不安全概率应比较大, 而集合 Γ_2 中的故障的发生概率和故障后的动态不安全概率相对较小, 因此对此集合中的故障可以不采取安全控制措施(事实上不可能对所有的故障均保证系统安全). 称集合 Γ_1 为安全控制事故集, 称集合 Γ_2 为无安全控制事故集.

能够采取的安全控制措施包括预防控制措施和紧急控制措施两种. 根据采取安全控制措施的不同, 进一步可以将预想事故集合 Γ_1 分为 2 个子集, 分别定义如下.

(i) 采取预防控制措施保证暂态稳定事故集

$$\Gamma_{1p} := \{E_i | y = y_0 + \zeta \in \Omega_d(E_i), \forall i \in \Gamma_1\}, \quad (4)$$

式中, $\Omega_d(E_i)$ 为故障 E_i 的基本实用动态安全域(BPDSR).

(ii) 采取紧急控制措施保证暂态稳定事故集

$$\Gamma_{1e} := \{E_i | y = y_0 + \zeta \in \Omega_d(E_i, e_i), \forall i \in \Gamma_1\}, \quad (5)$$

式中, e_i 为针对事件 E_i 采取的紧急控制措施, $\Omega_d(E_i, e_i)$ 为采取紧急控制措施 e_i 后的扩展动态安全域(EPDSR)^[13].

事实上采取控制措施前的注入功率向量 y_0 是随机向量, 为了便于进行划分, 集合 Γ_{1p} 和 Γ_{1e} 是针对注入 y_0 的期望值所确定的. 将集合 Γ_{1p} 和 Γ_{1e} 分别称为预防控制稳定事故集和紧急控制稳定事故集.

对某些事故采用预防性控制保证系统是暂态稳定的, 实际是通过再调度等措施改变系统的运行点

使其拉回到基本实用动态安全域内; 而对某些事故采用紧急控制措施保证系统是暂态稳定的, 是通过切机、切负荷来扩大基本实用动态安全域, 从而使运行点位于扩展实用动态安全域内. 实际进行安全控制时, 为了降低总的动态安全控制成本可以把两种控制方法结合起来进行. 首先用预防控制把运行点 y_0 拉到集合 Γ_{lp} 中的预想事故的安全域的一点 y , 或接近该域. 对于后一情况, 需要为 Γ_{le} 中的每一事故选择一种紧急控制措施, 使事故相应的扩展动态安全域能包含 y . 本文采用综合控制的方法进行安全控制.

1.3 动态不安全风险的计算

由于当事故发生后系统不会任其自由发展, 而是会采取一定的紧急控制措施以尽量减小故障所造成的影响, 因此在动态不安全风险计算中也需要计及各种紧急控制的作用和成本. 根据对预想事故的分类, 系统动态不安全风险的计算分为预防控制成本(影响)、紧急控制成本(影响)和控制无效事故的影响 3 种情况. 动态不安全风险计算流程如图 1 所示.

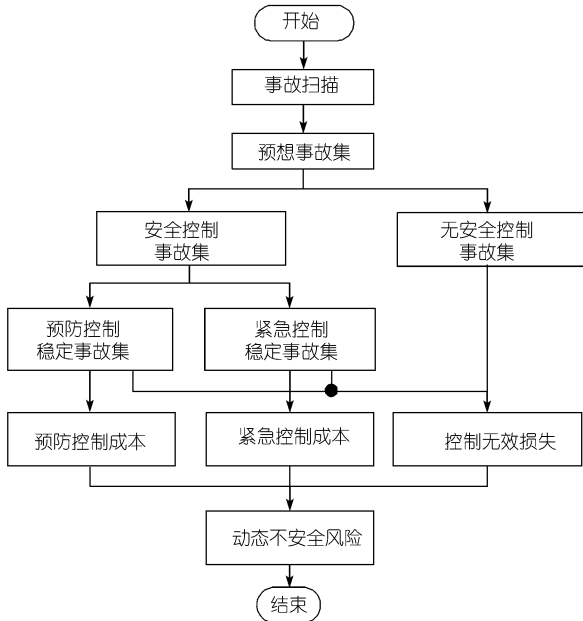


图 1 动态不安全风险计算流程

1.3.1 预防控制成本 $\text{Im}^{\text{pre}}(y)$. 预防控制针对预防控制事故集合 Γ_{lp} 中的故障进行. 由于不管预想事故是否发生均需要采取预防控制, 因此取事故发生概率为 1. 预防控制成本包括备用容量成本 $C^{\text{res}}(z)$ 和再

调度成本 $C^{\text{red}}(\zeta)$, 即有

$$\text{Im}^{\text{pre}}(y) = C^{\text{res}}(z) + C^{\text{red}}(\zeta). \quad (6)$$

1.3.2 紧急控制成本 $\text{Im}^{\text{emer}}(E_i, e_i)$. 对故障 i 采取紧急控制措施 e_i 的控制成本包括停机和启动成本、替代成本和负荷中断成本 3 部分^[6].

$$\begin{aligned} \text{Im}^{\text{emer}}(E_i, e) = & \text{Im}^{\text{repl}}(E_i, e) + \text{Im}^{\text{repair}}(E_i, e) \\ & + \text{Im}^{\text{load}}(E_i, e), \forall i \in \Gamma_{le}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\text{Im}^{\text{repl}}(E_i, e)$ 为替代成本, $\text{Im}^{\text{repair}}(E_i, e)$ 为停机和启动成本, $\text{Im}^{\text{load}}(E_i, e)$ 为负荷中断成本.

1.3.3 安全控制措施无效的社会影响 $\text{Im}^{\text{out}}(E_i)$. 对某一事故安全控制无效造成的社会损失, 需要综合考虑如下两方面的因素: 未供能量损失(unsupplied energy), 社会和政治影响(social and political impact)^[5]. $\text{Im}^{\text{out}}(E_i)$ 可表示为

$$\text{Im}^{\text{out}}(E_i) = B \times t_i \times P(i) \times (1 + C(E_i)), \quad (8)$$

式中, B 为单位损失电量的平均损失价值, 可由电力系统对以往事故的统计资料获得; t_i 为停电时间; $P(i)$ 为停电负荷总功率; $C(E_i)$ 为 $\text{Im}^{\text{out}}(E_i)$ 中反映系统安全控制无效造成的社会、政治影响的因子, 可参照文献^[5]中的表 1 取值.

当不考虑节点注入功率的不确定性时, 若预防控制后的系统运行点 y 位于事故 E_i 的基本实用动态安全域 $\bigcap_{\forall i \in \Gamma_{lp}} \Omega_d(E_i)$ 内, 或者对任一 $i \in \Gamma_{le}$, 紧急控制 e_i 后的系统运行点 y_0 位于事故 E_i 的扩展实用动态安全域 $\Omega_d(E_i, e_i)$ 内, 则 $\text{Im}^{\text{out}}(E_i) = 0$. 当计及节点注入功率的不确定性时, 采取预防/紧急控制措施后, 系统仍有一定的动态不安全概率. 因此对于集合 Γ_{lp} 和 Γ_{le} 中的故障, 还会产生一定的控制无效造成的影响, 需要在安全控制措施无效的影响中计入这部分影响.

根据(6)~(8)式的计算, 计及节点注入功率不确定性的影响后, 系统动态不安全风险重新计算如下

$$\begin{aligned} R(y) = & \sum_{E_i \in \Gamma} \text{Pr}(\text{DIS} \cap E_i) \text{Im}(y, E_i) \\ = & \text{Im}^{\text{pre}}(y) + \sum_{E_i \in \Gamma_{le}} \text{Pr}(E_i) \text{Im}^{\text{emer}}(E_i, e_i) \\ & + \sum_{E_i \in \Gamma} \text{Pr}(E_i) \text{Pr}(\text{DIS} | E_i) \text{Im}^{\text{out}}(E_i), \end{aligned} \quad (9)$$

式中, 前两项为针对预想事故集合 Γ_{1p} 和 Γ_{1e} 中的故障分别采取预防控制和紧急控制措施的期望控制成本(根据控制前的期望注入功率计算), 第三项为计及节点注入功率不确定性后安全控制无效的影响。

2 风险控制最优化模型

显然不采取任何控制措施时, 安全控制成本最小, 事故造成的影响最大; 采取一定的控制措施后事故造成的影响会降低, 但需要一定的控制成本。因此计算风险时可以对采取不同控制措施的系统风险进行比较以得出最优的控制方案。

风险控制最优化的计算步骤如下。

步骤 1 首先进行初始风险计算。令初始安全控制预想事故集合 $\Gamma_1 = \Gamma$, 进行安全控制成本优化, 计算综合控制成本、控制无效影响和系统总风险;

步骤 2 对 Γ_1 中的故障按影响大小排序, 将其中影响最小的故障并入无安全控制事故集 Γ_2 中, 形成新的安全控制事故集 Γ_1 ;

步骤 3 针对采取控制措施前的期望运行点和 Γ_1 中的预想事故, 进行预防控制和紧急控制措施的优化计算, 得到优化后的期望控制成本/风险;

步骤 4 计算 Γ_1 中预想事故由于负荷不确定性产生的系统控制无效的风险值和 Γ_2 中预想事故的风险值, 得到系统总的风险;

步骤 5 判断系统总的风险是否比上次减小。若减小则转步骤 2, 继续计算; 否则结束计算, 输出系统风险值、控制成本、紧急控制措施 e 、再调度运行点 y 和安全控制事故集合 Γ_1 等优化结果。

系统风险控制最优化计算流程如图 2 所示。由于对于给定的节点注入功率期望值 y_0 和预想事故集合 Γ , 随着安全控制事故集合中故障数目的减少, 控制成本单调降低, 控制无效风险单调增加, 因此最优解一定存在。由于影响越严重的故障所产生的控制无效风险越大, 因此系统风险的最优解(即 Γ_1 和 Γ_2 的分割点)应该在控制无效风险小的一端。步骤 2 的处理可以使我们能够尽快地找到系统总风险的最优解。

优化计算中的预防控制和紧急控制最优化需要分两步进行。一是求取针对每一种控制措施的控制成本的优化计算, 二是对预想事故集合 $\Gamma_1 = \Gamma_{1p} \cup \Gamma_{1e}$

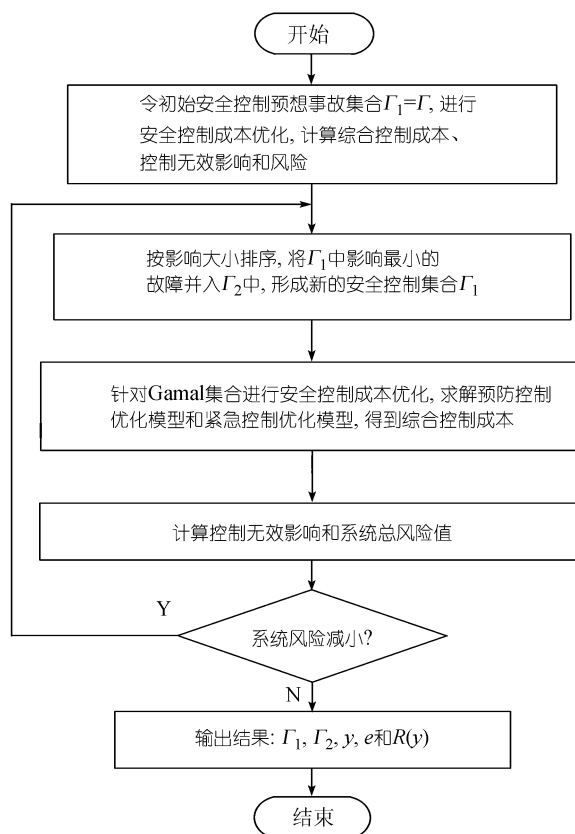


图 2 风险控制最优化计算流程

(其中 $\Gamma_{1p} \cap \Gamma_{1e}$ 是空集)进行优化划分。安全性综合控制优化模型是一个有动态约束的混合非线性双层优化问题^[13]。外层优化决定约束的动态变化, 它把预想事故集 Γ 分解为 Γ_{1p} 和 Γ_{1e} , 为内层优化提供固定的约束集; 内层优化是对于给定的 Γ_{1p} 和 Γ_{1e} , 选择控制总成本最小的预防控制和紧急控制方案。模型中以实用动态安全域的临界超平面为暂态稳定约束。此类约束为线性不等式方程, 在优化问题中比较容易处理。

3 算例分析

本文以 10 机 39 节点新英格兰系统为例, 对所提模型和算法进行检验。新英格兰系统接线图如图 3 所示。

确定预想事故集合 Γ 时, 针对系统日最大负荷, 计算 $N-1$, $N-2$ 以及 $N-3$ 故障的动态不安全概率, 根据故障对系统不安全概率贡献的大小(严重程度和概率大小)进行排序, 由动态不安全概率截断阈值确定主导预想事故集 Γ 。动态不安全概率截断阈值 ε 可由运

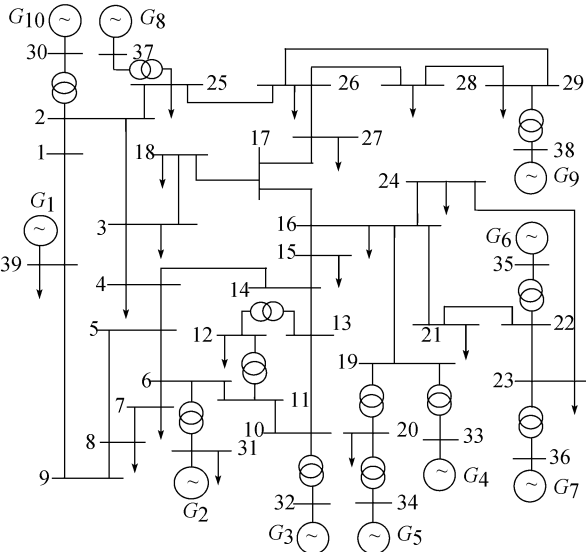


图3 10机39节点系统

行人员根据实际情况确定, 本文暂定 ε 为 1.0×10^{-16} . 预想事故的排序结果如表1所示. 根据给定的动态不安全概率截断阈值 ε , 主导预想事故集 Γ 由41个故障组成, 其中有 $N-1$ 故障17个, $N-2$ 故障18个, $N-3$ 故障6个. 针对既定的系统拓扑, 采用离线计算的方法确定主导预想事故集, 供在线风险评估时使用. 为使问题简化, 本文对既定的网络拓扑, 用正常天气和预测的峰值负荷确定 Γ 的初集, 在线运行时 Γ 可以随时更新, 以便增加位于恶劣天气区域的线路故障.

为了简化算例作如下假设: 1) 假设紧急控制时发电机被切除后的关闭时间是10 h, 关闭后缺额发电量由平衡机补充, 各节点上发电机的关机和启动成本根据发电机容量设为不同的常数; 2) 假设事故引起系统失稳时, 系统有 $P=6150$ MW 负荷停电, 停电时间均为 $t=1$ h, 单位损失电量的平均价值 $B=625$ \$/MWh; 3) 为了紧急控制实施的方便, 将每个发电机节点上的机组等效为5台同型号的发电机. 选择39号母线发电机节点为平衡节点, 其所接的发电机不参与调度, 其余所有节点上的发电机和负荷都参与安全性控制.

图4给出了系统风险随着安全控制事故数量变化的趋势. 从图4中可以看出, 进行安全控制后, 一开始系统风险下降明显, 随后随着安全控制预想事故集合中的故障数量增加, 风险缓慢下降, 而安全控制

成本逐步增加. 当进行安全控制的事故个数为20个时, 系统总风险达到最小.

表2给出了按照不同控制方案进行系统风险控

表1 预想事故的排序结果

故障序号	动态不安全概率	故障序号	动态不安全概率	故障序号	动态不安全概率
30	4.67×10^{-4}	58	6.48×10^{-7}	10	2.01×10^{-16}
29	3.19×10^{-4}	54	5.38×10^{-7}	4	1.81×10^{-17}
31	1.10×10^{-4}	57	3.00×10^{-7}	13	1.73×10^{-17}
24	9.44×10^{-5}	53	2.70×10^{-7}	8	1.32×10^{-17}
28	3.42×10^{-5}	26	2.58×10^{-7}	25	1.24×10^{-17}
3	2.70×10^{-5}	39	8.02×10^{-9}	27	7.88×10^{-18}
20	2.13×10^{-5}	47	6.06×10^{-9}	16	5.87×10^{-18}
51	1.46×10^{-5}	48	5.58×10^{-12}	14	4.55×10^{-18}
40	1.44×10^{-5}	1	1.33×10^{-12}	33	1.53×10^{-18}
19	1.33×10^{-5}	37	6.02×10^{-13}	6	1.26×10^{-18}
45	1.26×10^{-5}	50	2.79×10^{-13}	15	8.98×10^{-19}
49	1.03×10^{-5}	41	1.92×10^{-13}	7	8.54×10^{-19}
35	8.85×10^{-6}	22	2.53×10^{-14}	9	1.70×10^{-19}
36	8.68×10^{-6}	18	1.31×10^{-14}	43	1.69×10^{-19}
34	7.03×10^{-6}	32	7.35×10^{-15}	17	9.66×10^{-19}
52	6.59×10^{-6}	38	5.01×10^{-15}	12	0.00
46	4.27×10^{-6}	2	3.36×10^{-15}	21	0.00
44	2.78×10^{-6}	23	1.68×10^{-15}	42	0.00
55	2.76×10^{-6}	11	6.34×10^{-16}		
56	8.72×10^{-7}	5	3.24×10^{-16}		

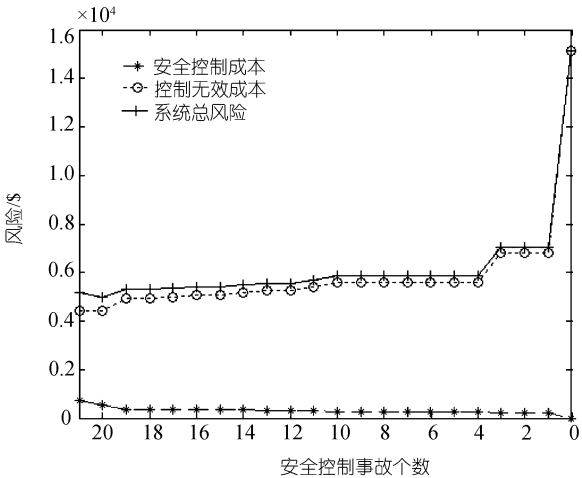


图4 风险指标与综合安全控制事故个数关系图

表 2 不同控制方案系统风险比较

控制方式	控制无效风险/\$	预防控制成本/\$	紧急控制期望成本/\$	总控制成本/\$	总风险/\$
无控制	1.52×10^4	0	0	0	1.52×10^4
预防控制	5189	2384	0	2384	7573
综合控制	4436	452	281	733	5168

制的比较. 从表 2 中可以看出当对预想事故不采取控制措施时, 系统的总风险较高, 采用预防控制或紧急控制措施后系统的风险水平会有明显的下降. 通过对预防控制和综合控制进行比较, 综合控制的总控制成本、控制无效的风险值和系统的总风险均较小, 因此采用综合控制有比较明显的优势.

图 5 为安全控制前和安全控制后各个故障的系统控制无效风险对比. 从图 5 中可以看出安全控制前后, 各故障的系统控制无效风险普遍降低. 其中有个别故障后的系统控制无效风险反而增加了, 例如故障 20, 有的故障后的系统控制无效风险变化不大, 例如故障 3. 这是由于经过安全控制后, 系统的运行点发生变化, 可能导致对于某些故障系统变得更加不稳定, 也就是说安全控制会带来一些副作用. 虽然这种副作用不能完全避免, 但从整体控制效果来看, 系统风险有了很大的降低, 安全控制效果显著.

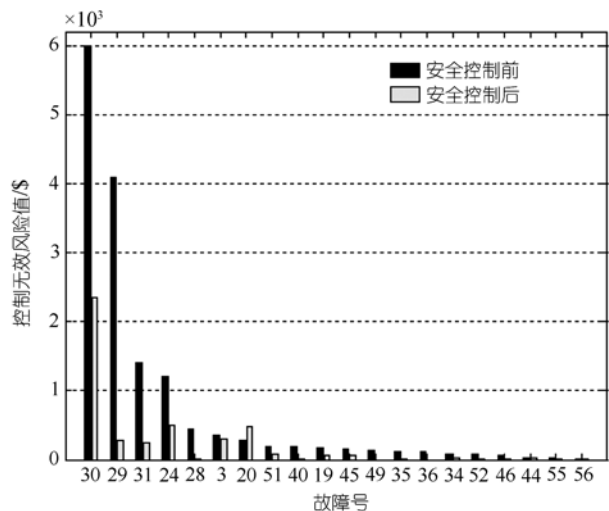


图 5 安全控制前后各故障控制无效风险对比

经过对预防控制措施的优化, 能够得到再调度后的系统运行工况. 通过对紧急控制措施的优化计算, 可以得到为紧急控制子集中的每个事故准备的

一套紧急控制措施, 当事故一旦发生时可以采取该紧急措施, 使系统能够保持稳定运行. 优化后的紧急控制措施可以用于指导运行人员进行紧急准备. 表 3 为综合控制中的紧急控制子集 Γ_{1e} 和相应的紧急控制措施.

表 3 紧急控制子集和控制措施

紧急控制子集事故编号	紧急控制措施
52	切除 31 号节点的 1 台机
36	切除 31 号节点的 1 台机
49	切除 31 号节点的 1 台机

4 结论

本文首先提出一种基于实用动态安全域的动态不安全风险评估和优化模型. 在动态不安全风险计算中计及了系统安全控制措施和节点注入功率的不确定性对风险的影响, 而实用动态安全域的应用可以比较方便地计及暂态稳定约束和节点注入功率的不确定性. 其次给出了一种确定和划分预想事故集合 $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ 的方法, 并以系统动态不安全风险最小为目标, 给出了针对主导预想事故集的一种风险控制的最优化模型. 风险优化可分为两层进行, 外层为对预想控制集合的优化(即确定优化的 $(\Gamma_{1p}, \Gamma_{1e})$), 内层为针对一个既定的事故子集 $(\Gamma_{1p}, \Gamma_{1e})$ 进行的综合安全控制成本的优化.

最后以 New England 10 机 39 节点系统为例对所建立模型的合理性及算法的可行性进行了验证. 算例表明, 采取一定的安全控制措施后可以大大降低系统的风险水平, 与仅采取预防控制的风险控制相比较, 经过优化后的综合控制效果更好. 风险控制优化可用于辅助运行人员, 通过综合考虑经济和系统安全控制指标, 进行预防控制和紧急控制决策.

参考文献

- 1 U S-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations. United States: Washington D C, 2004
- 2 李文沅, 著, 周家启, 卢继平, 胡小正, 等, 译. 电力系统风险评估-模型、方法和应用. 北京: 科学技术出版社, 2006
- 3 史慧杰, 葛斐, 丁明, 等. 输电网络运行风险的在线评估. 电网技术, 2005, 29(6): 43—48
- 4 Li W Y, Korczynski J K. Risk evaluation of transmission system operation modes: Concept, method and application. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York: IEEE Press, 2002. 1124—1129
- 5 McCalley J D, Fouad A A, Vittal V, et al. A risk based security index for determining operating limits in stability limited electric power systems. IEEE Trans Power Syst, 1997, 12(4): 1210—1219 [\[DOI\]](#)
- 6 Vittal V, McCalley J D, Van Acker V, et al. Transient instability risk assessment. In: Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton: IEEE Press, 1999. 206—211
- 7 Van Acker V, McCalley J D, Vittal V, et al. Risk-based transient stability assessment. In: Proceedings of 1999 PowerTech Conference. Ames: Iowa State University, 1999. 235
- 8 余贻鑫. 电力系统安全域实用化研究现状. 南方电网技术研究, 2006, 2(3): 7—14
- 9 王东涛, 余贻鑫, 付川. 基于实用动态安全域的输电系统概率动态安全评估. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 29—33
- 10 哈比比, 余贻鑫, 孙刚. 基于安全域的电力系统有功与无功优化. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 1—10
- 11 曾沅, 余贻鑫. 电力系统动态安全域的实用解法. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 24—28
- 12 IEEE. The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms 5th Edition. New York: IEEE Press, 1993
- 13 刘辉, 余贻鑫. 基于实用动态安全域的电力系统最优安全性综合控制. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 31—36