DOI: 10.7667/PSPC161901

一种基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索方法

陈学通[1,2]，凌 超[1]，薛 峰[1,2]，周 野[1]，宋晓芳[1,2]

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院)，江苏 南京 211106；
2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室，江苏 南京 211106)

摘要：间歇式能源接入、全国电网互联、在线运行保护与控制需求等多重因素对电网紧急控制策略搜索提出了新的要求。为此提出了一种基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索方法。该方法选择预想故障集中某一失稳算例进行时域仿真，再根据 EEAC 量化理论计算每个紧急控制措施性能指标，基于性能指标计算出紧急控制空间中各紧急控制措施性价比，其关键在于计算出采取紧急控制措施前后系统暂态稳定裕度的变化量。然后采用贪心算法在候选紧急控制空间搜索出紧急控制策略。最后通过简单电力系统和实际电网两个算例验证了该方法的正确性。

关键词：EEAC 量化理论；紧急控制；贪心算法；策略搜索

A fast method of searching optimal emergency control strategy based on greedy algorithm

CHEN Xuetong[1,2], LING Chao[1], XUE Feng[1,2], ZHOU Ye[1], SONG Xiaofang[1,2]

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
2. State Key Lab for Smart Grid Protection and Operation Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: It puts forward new requirements to strategy searching of emergency control considering multiple factors, such as intermittent energy access, the interconnection of national power grid, and requirement of operation protection and control online operation. This paper proposes an optimal searching method of the emergency control strategy based on greedy algorithm. This method does time-domain simulation by choosing a certain instability case of the expected fault set and calculates performance index of each emergency control measure based on the theory of quantitative analysis of EEAC, based on which calculates the price ratio of each emergency control measure in emergency control space. The key is to calculate variable quantity of transient stability margin before and after taking emergency control measures. Then it searches out the optimal emergency control strategy in candidate emergency control space through greedy algorithm. Finally, the correctness of the proposed method is verified by a simple power system and a real power grid.

Key words: EEAC quantitative theory; emergency control; greedy algorithm; strategy searching

0 引言

随着新能源发电技术的发展，电力电子型设备增多，特高压交直流混合电网的建立，全国电网互联，电网的安全稳定控制越来越复杂[1-4]。其中，电力系统紧急控制作为三道防线的重要内容，防止系统失去稳定或者使失稳系统恢复稳定，在保护电力系统安全稳定运行过程中发挥了重要作用。常规的紧急控制措施包括切机、切负荷、直流紧急调制等[5-6]。近年来，随着西南水电基地、“三北”风电基地、西北太阳能发电基地以及特高压交直流输电通道的建立，电能跨区远距离输送，使得电网的运行特性愈发复杂，带来了新的安全稳定问题，这对安控系统提出了更高的要求[7-9]。同时也出现了一些新型紧急控制措施，比如利用 SVC 补偿无功来保持电压稳定，可控串补提升线路输送功率，柔性输电技术，需求侧响应技术等[10-14]。那么如何从这些紧急控制措施之中快速搜索出性价比高的控制措施并制定优化的紧急控制策略尤为重要，对提高电力系统的安全与经济运行意义重大。

电力系统紧急控制策略主要有“离线预决策，实时匹配”、“在线预决策，实时匹配”和“实时计算，实时控制”三种形式[15]。第一种依赖于离线生成的策略表，后两种要求计算具有相当的快速性，还没有广泛应用[16-17]。目前常用的紧急控制策略搜

基金项目：国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1501168)“计及智能可控设备的安全稳定控制协同优化技术研究”

索方法有枚举法、二分法和性价比法[18-20]。枚举法算法简单，实施容易，但是对于庞大复杂的电网，其计算量太大，运算时间太长，且现有的文献中很少考虑不同紧急控制措施的性能差异；二分法在候选紧急控制空间中插入或者删除一个紧急控制措施，均需重新排列，大大增加了计算量。性价比法虽然考虑到各个紧急控制措施的性能差异，搜索速度快，但是按照性价比由高到低逐个采取紧急控制措施，直至失稳系统恢复稳定，可以得到比较经济的控制策略，但一些情况下易搜索到比较保守的控制策略，控制代价偏大。

针对上述紧急控制策略搜索方法的缺点，本文提出了一种基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索方法。该方法根据预想故障集中的某一失稳算例，通过仿真得到不实施紧急控制时的仿真结果，再结合 EEAC，计算出各紧急控制措施的性能指标并得到其性价比，根据性价比由高到低选择紧急控制措施，直至暂态稳定裕度高于事先所设定的下限。若暂态稳定裕度超出设定上限，则进一步利用贪心算法修正当前紧急控制策略，得到优化的紧急控制策略。最后通过实例仿真验证了该方法的正确性和有效性。

1　基于 EEAC 的性能指标

电力系统的暂态稳定性是非自治非线性多刚体运动系统稳定性的一个典型例子，其数学模型是强非线性的微分代数方程组，阶数可达数万，并带有连续和/或不连续的时变参数[21]。扩展等面积法则(EEAC)是求解并量化该问题的有力工具。EEAC 阐述了电力系统暂态稳定性的机理和规律，EEAC 将复杂模型和复杂场景的全部动态方程进行完整的数值仿真，再将全部受扰轨迹以穷尽方式分解为互补的两群，用两群各自等值惯量中心的等值轨迹构成等值非自治两刚体相对运动的受扰轨迹，在每一种互补划分方式所对应的扩展相平面上，严格地给出等值两刚体映象相对运动的稳定性充要条件，给出轨迹稳定裕度的表达式，从而，两群的暂态稳定性分析得以量化[21]。EEAC 理论已经成功地应用于国内外电力系统的多项工程中，带来了显著的经济效益[22]。

若实施紧急控制后系统处于临界状态，首摆动态鞍点所对应的转子角为 $\delta_{\mathrm{DSP}}^{*}$，由 EEAC 可得不实施紧急控制和实施紧急控制后 OMIB 等值机的功角—功率差曲线如图 1 所示[23-24]。

图 1 中，δ_0、δ_{cl}、δ_{cg} 分别为 OMIB 等值机故障时刻、故障切除时刻和紧急控制时刻等值角；δ_{DSP} 和 $\delta_{\mathrm{DSP}}^{*}$ 分别为不实施紧急控制和实施紧急控制后 OMIB 等值机动态鞍点所对应的等值角；$P_{\mathrm{e}}-P_{\mathrm{m}}$ 和 $P_{\mathrm{e}}^{*}-P_{\mathrm{m}}^{*}$ 分别为不实施紧急控制和实施紧急控制后 OMIB 等值机的电磁功率和机械功率之差；$\Delta P'$ 为等值紧急控制量。A_1 为首摆加速面积，可由式(1)得到；A_2 为不实施紧急控制首摆最大减速面积，可由式(2)得到；A_3 为实施紧急控制后首摆增加的减速面积。

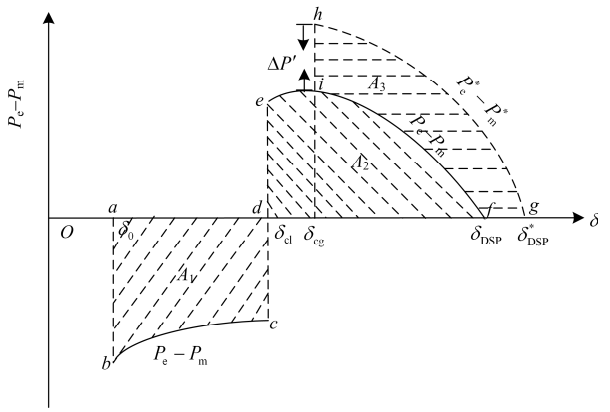


图 1　OMIB 等值机首摆功角—功率差曲线

Fig. 1 Power-angle to power-difference curves of first swing in OMIB equivalent machine

$$A_1=\int_{\delta_0}^{\delta_{\mathrm{cl}}}\left(P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}\right)\mathrm{d}\delta=\frac{M}{2}\left(\omega_{\mathrm{cl}}\right)^2 \tag{1}$$

$$A_2=\int_{\delta_{\mathrm{cl}}}^{\delta_{\mathrm{DSP}}}\left(P_{\mathrm{e}}-P_{\mathrm{m}}\right)\mathrm{d}\delta=\frac{M}{2}\left[\left(\omega_{\mathrm{cl}}\right)^2-\left(\omega_{\mathrm{DSP}}\right)^2\right] \tag{2}$$

式中：ω_{cl}、ω_{DSP} 分别为 OMIB 等值机故障切除时刻、不实施紧急控制动态鞍点所对应的角速度；M 为 OMIB 等值机惯性时间常数。

假设从紧急控制时刻到紧急控制后的动态鞍点时刻，功率差的变化量均不变，则 A_3 的计算公式为

$$A_3=\Delta P\left(\delta_{\mathrm{DSP}}-\delta_{\mathrm{cg}}\right)+\left|\frac{1}{3}a\delta^3+\frac{1}{2}b\delta^2+\left(c+\Delta P\right)\right|_{\delta_{\mathrm{DSP}}}^{\delta_{\mathrm{DSP}}^{*}} \tag{3}$$

其中，

$$\delta_{\mathrm{DSP}}^{*}=\frac{-b-\sqrt{b^2-4a\left(c+\Delta P\right)}}{2a} \tag{4}$$

式中，a、b、c 可以通过 δ_{DSP} 之前的部分数据利用二次拟合得到。

前述的 δ_0、δ_{cl}、δ_{cg}、δ_{DSP} 可以通过仿真得到。

根据 EEAC 可知，实施紧急控制后减速面积增加得越多，说明控制效果越好，因此本文利用单位控制量下稳定裕度的增量作为紧急控制的评价指标，数学表达式为

$$\gamma=\frac{\Delta\eta}{\Delta P}=\frac{A_3}{A_1}\Big/\Delta P \tag{5}$$

式中：$\Delta\eta$ 为实施紧急控制前后系统稳定裕度的变化量；ΔP 为紧急控制量。

2　贪心算法

2.1 贪心算法的基本思想

贪心算法的思路是通过一系列的分级处理来得到待解决问题的最优解，它的每一次选择是在当前状态下的最优选择，也就是贪心选择，先求出每个问题的局部最优解，继而得到整个问题的最优解[25-26]。

将候选控制空间中所有的紧急控制措施分为三个集合：已经实施的紧急控制措施集 K_{p}、当前搜索中的紧急控制措施集 K_{n}、未搜索到的紧急控制措施集 K_{f}。

贪心算法将对候选控制空间中所有紧急控制措施的优化搜索转化成对上述搜索集的优化搜索，通过多次局部搜索优化控制措施即可得到优化后的紧急控制策略。

2.2 基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索步骤

基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索具体步骤如图 2 所示。

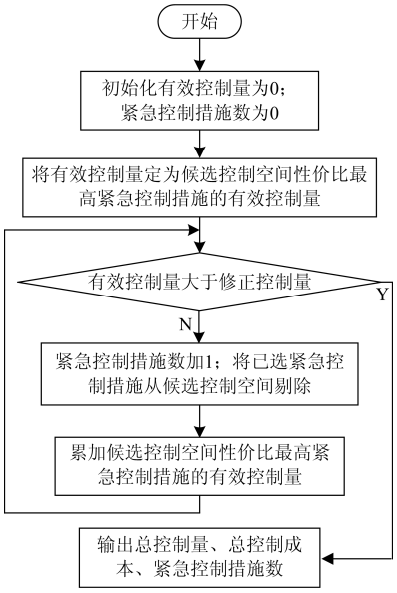


图 2 基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索步骤

Fig. 2 Optimal searching steps of the emergency control strategy based on greedy algorithm

紧急控制策略搜索过程就是在紧急控制代价和暂态稳定裕度之间找到平衡。在程序中其主要步骤为：首先根据候选控制空间紧急控制措施的性价比从低到高排列各控制措施，性价比值放在向量 ***a*** 中，位置向量放在向量 ***b*** 中，按照贪心策略，首先考虑采取性价比最高的控制措施，即控制措施 ***b***(n)，当采取该措施后暂态稳定裕度不满足要求，则累计采取该措施成本和控制量，并继续采取下一个紧急控制措施 ***b***(n−1)，如此循环，直至满足要求。按照这种方法得到紧急控制策略即为紧急控制策略优化。

3　基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索方法

基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索流程图如图 3 所示。

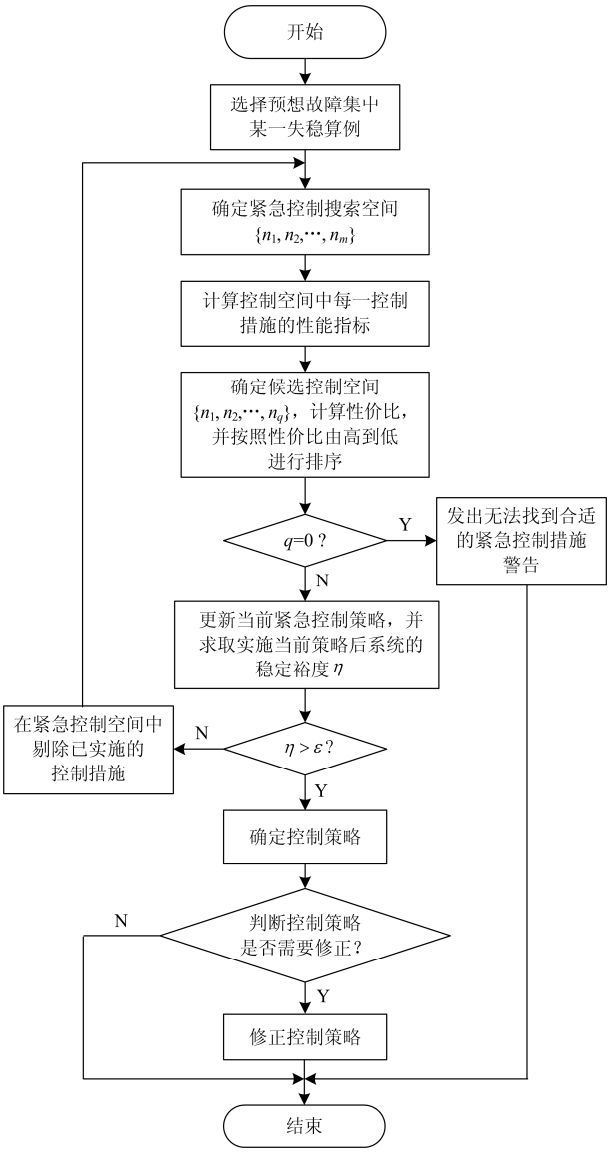


图 3 基于贪心算法的紧急控制优化策略搜索流程图

Fig. 3 Optimal searching flow chart of the emergency control strategy based on greedy algorithm

电力系统运行过程中，常见短路故障、发电机组故障和母线故障等，现在随着全国电网互联，直流线路故障和相继故障风险增加，因此在紧急控制策略搜索过程中，首先需要根据电网的运行工况识别出可能发生的故障，并形成故障集。利用时域仿真法对预想故障集中的故障进行暂态仿真，选择某一失稳算例。

电力系统紧急控制措施包括切机、切负荷和直流调制等。根据电网当前工况、预想故障和电网的失稳形式，确定可行的紧急控制措施，形成紧急控制搜索空间$\{n_1, n_2, \cdots, n_m\}$，并根据式(5)计算控制空间中每一控制措施的性能指标。

进一步根据式(6)计算候选控制措施的性价比指标。

$$\alpha_i = \frac{\gamma_i}{C_i} \tag{6}$$

式中：γ_i为紧急控制措施 i 的性能指标；C_i为紧急控制措施 i 的控制代价。

按照控制措施的性价比由高到低进行排序，根据式(7)约束条件确定候选控制措施空间$\{n_1, n_2, \cdots, n_q\}$。

$$\begin{cases} \gamma_i > \varepsilon_1 \\ \Delta P^i_{\text{e,OMIB}} > \varepsilon_2 \end{cases} \tag{7}$$

式中：$\Delta P^i_{\text{e,OMIB}}$为采取紧急控制措施 i 后 OMIB 等值机功率差变化量；ε_1一般取 0.01，ε_2一般取 0.1。如果 q=0，表示在当前故障下，电网的实际工况没有可行的紧急控制措施，候选控制措施空间为空，此时发出警告。

选取性价比最高的紧急控制措施，加入到之前的紧急控制策略中，得到新的紧急控制策略。然后利用 EEAC 理论进行暂态稳定裕度量化评估。当暂态稳定裕度大于事先设定的暂态稳定裕度下限，即可得到一个紧急控制策略。但此策略并不一定是最优紧急控制策略，需进行判断是否需要进一步的修正。

根据式(8)判断当前紧急控制策略是否需要修正。

$$\eta > \eta_3 \tag{8}$$

式中，η_3为设置的安全暂态稳定裕度范围上限。

若此时稳定裕度满足式(8)，说明当前控制策略偏保守，需要修正紧急控制策略。修正方法如下。

定义第 i 个紧急控制措施的有效控制量为

$$\overline{P_i} = \gamma_i \Delta P_i \tag{9}$$

式中，ΔP_i为第 i 个紧急控制措施的控制量。

则修正的有效控制量目标值为

$$\overline{P}' = \sum_{k=1}^{j-1} \overline{P_k} + \overline{P_j} \left(\frac{\dfrac{\eta_2 + \eta_3}{2} - \eta_1}{\eta_4 - \eta_1} \right) \tag{10}$$

式中：$\overline{P_j}$为最后一次加入紧急控制措施的有效控制量；η_1为加入 j–1 次紧急控制措施后的暂态稳定裕度；η_2为设置的安全暂态稳定裕度范围下限；η_4为最后一次加入紧急控制措施后的暂态稳定裕度。

以最小控制代价为目标，易得修正紧急控制策略的数学模型为

$$\min \Delta P = \sum_{i=1}^{q} n_i C_i \Delta P_i \tag{11}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{q} n_i \gamma_i \Delta P_i \geq \overline{P}' \tag{12}$$

式中：q 为候选紧急控制措施数量；若第 i 个候选紧急控制措施被执行则$n_i = 1$，否则$n_i = 0$。上述线性规划利用第 2 节中所述的贪心算法易解，其解为修正后的控制策略。

4　算例

我国现行的《电力系统安全稳定导则》对系统运行的暂态稳定裕度有一定的要求，规定系统必须能够承受一定的扰动。本文算例设定暂态稳定裕度范围为 20%~50%，暂态稳定裕度低于 20%，系统抗扰动能力不足，失稳风险过大，暂态稳定裕度高于 50%，紧急控制量过大，造成紧急控制代价过大。

1) 算例 1

如图 4 所示简单电力系统。G1—G10 为同步发电机，G1—G10 有功出力分别为 84 MW、84 MW、336 MW、336 MW、84 MW、84 MW、336 MW、336 MW、1054 MW、2000 MW。G11、G12、G13 为风力发电机，G11 有功出力为 84 MW，G12 有功

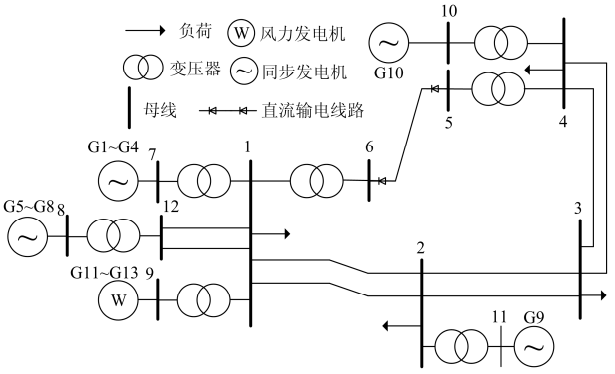


图 4 简单电力系统

Fig. 4 Simple power system

出力为 336 MW，G13 有功出力为 420 MW，母线 5 与母线 6 之间通过直流直接连接。0 s 时刻母线 1 至母线 2 之间的一条线路靠近母线 2 的地方发生三相短路故障，0.1 s 断开该线路，故障消除。仿真计算可得的系统暂态功角失稳，暂态稳定裕度为−24.05%。

在紧急控制中，直流调制功率一般为直流额度输送功率的 10%，火电厂至少需要保留一台发电机，同时将风电场的部分风机纳入调控范围，由此确定紧急控制搜索空间为[直流调制，切除风机 G1，切除风机 G2，切除 G1，切除 G3，切除 G5，切除 G6，切除 G7，切除 SOUTH 节点负荷]，假设切负荷成本为 0.5 万元/MW ，切火电成本为 0.2 万元/MW，切风电成本为 0.1 万元/MW，直流功率调制成本为 0.02 万元/MW。计算得到紧急控制搜索空间中每个紧急控制措施的性能指标、性价比和有效控制量如表 1 所示。

表 1 各紧急控制措施计算结果

Table 1 Calculation results of each emergency control measure

序号	紧急控制措施	控制量/MW	性能指标	性价比	有效控制量 P_i
1	直流调制	90	0.1224	6.1200	11.02
2	切风机 G1	84	0.1481	1.4810	12.44
3	切风机 G2	84	0.1506	1.5060	12.65
4	切除 G1	84	0.1754	0.8700	14.73
5	切除 G3	336	0.1561	0.7805	52.45
6	切除 G5	84	0.1344	0.6720	11.29
7	切除 G6	84	0.1344	0.6720	11.29
8	切除 G7	336	0.1307	0.6535	43.92
9	切 SOUTH 节点负荷	90	0.1088	0.2176	9.79

根据表 1 按照性价比由高到低得到候选控制空间为[直流调制，切除风机 G2，切除风机 G1，切除 G1，切除 G3，切除 G5，切除 G6，切除 G7，切除 SOUTH 节点负荷]。

传统的性价比方法与本文提出的方法搜索结果对比如表 2 所示。

表 2 不同搜索结果对比

Table 2 Comparison between different searching results

对比项	传统性价比方法	本文提出的方法
总直流调制量/MW	90	90
总切风机量/MW	168	168
总切火电量/MW	420	168
总切负荷量/MW	0	0
总控制代价/万元	118.8	52.2
总控制量	5	5
紧急控制策略	[1 2 3 4 5]	[1 2 3 4 6]
采取紧急控制后暂态稳定裕度/%	85.50	42.15

从表 2 可以看出，本文提出的紧急控制策略优化搜索方法比传统性价比方法减少总切机量 252 MW，减少总控制代价 68.8 万元；并且采取通过本文提出方法得到的紧急控制策略后系统暂态稳定裕度在合理范围内，通过传统性价比方法得到的暂态稳定裕度超出了事先设定的暂态稳定裕度上限，说明传统性价比方法有时经济性并不高。

图 3 中，总搜索时间主要取决于实施当前紧急控制策略后求取系统的暂态稳定裕度所花费的时间，本文提出的方法是基于性价比排序进行搜索，所花费时间比性价比方法略长，但是相对于暂态稳定裕度计算时间，可以忽略。本文提出的方法与枚举法的效率对比结果如表 3 所示。

表 3 不同搜索方法效率对比

Table 3 Comparison of efficiency between different searching results

对比项	枚举法	本文提出的方法
搜索次数	9	5

从表 3 中可以看出，采用本文提出的方法得到的紧急控制策略搜索次数比采用枚举法少 4 次，每次搜索的时间主要取决于实施当前紧急控制策略后求取系统的暂态稳定裕度的时间，因此本文提出的方法在效率上有很明显的提升。

2) 算例 2

西北电网，共包含 703 台同步发电机，220 条 750 kV 母线、19 条 500 kV 母线、456 条 330 kV 母线，568 条 750 kV 线路、34 条 500 kV 线路、1574 条 330 kV 线路，126 台 750 kV 变压器、30 台 500 kV 变压器和 808 台 330 kV 变压器。酒泉—河西 750 kV 线路发生 N−2 故障，系统暂态失稳，暂态稳定裕度为−80.86%。为了保持送电端和受电端功率平衡，采取同时切同步发电机和切负荷紧急控制措施，根据仿真经验，切负荷量为切同步发电机量的 0.58 倍。

确定紧急控制搜索空间，直流调制控制量为 400 MW(天中直流)，切新疆火电机组 7 台，共 1460 MW，切甘肃风机，共 580 MW，切武圣负荷，共 1850 MW。假设切负荷成本为 0.5 万元/MW ，切火电成本为 0.2 万元/MW，切风电成本为 0.1 万元/MW，直流功率调制成本为 0.02 万元/MW。计算得到紧急控制搜索空间每个紧急控制措施的性能指标、性价比和有效控制量如表 4 所示。

根据表 4 按照性价比由高到低得到候选控制空间为 [天中直流调制 新轮台 24 新喀发 24 新库车 23 新庭州 23 新吐电 G1 新玛电 25 新天池 12 甘千北 62 甘千西 31 甘麻二 69 甘昌西 62 青鑫恒 31

青鑫恒 31 青营庄 11 青营庄 11 甘炳灵 21]。传统的性价比方法与本文提出的方法搜索结果对比如表 5 所示。

表 4　各紧急控制措施计算结果

Table 4 Calculation results of each emergency control measure

序号	紧急控制措施	控制量/MW	性能指标	性价比	有效控制量 P_i
1	天中直流调制	400	0.0410	2.0500	16.40
2	切除新喀发 24 火电	200	0.0376	0.1800	7.52
3	切除新吐电 G1 火电	135	0.0332	0.1660	4.48
4	切除新库车 23 火电	200	0.0366	0.1830	7.32
5	切除新庭州 23 火电	300	0.0358	0.1790	10.74
6	切除新天池 12 火电	125	0.0311	0.1555	3.89
7	切除新玛电 25 火电	200	0.0328	0.1640	6.56
8	切除新轮台 24 火电	300	0.0395	0.1975	11.85
9	切除甘麻二 69 风电	100	0.0356	0.3560	3.56
10	切除甘昌西 62 风电	100	0.0351	0.3510	3.51
11	切除甘千西 31 风电	180	0.0380	0.3800	6.84
12	切除甘千北 62 风电	200	0.0386	0.3860	7.72
13	切除甘炳灵 21 负荷	200	0.0140	0.0280	2.80
14	切除青营庄 11 负荷	413	0.0167	0.0334	6.90
15	切除青营庄 11 负荷	413	0.0167	0.0344	6.90
16	切除青鑫恒 31 负荷	412	0.0209	0.0418	8.61
17	切除青鑫恒 31 负荷	412	0.0209	0.0418	8.61

表 5 不同搜索结果对比

Table 5 Comparison between different searching results

对比项	传统性价比方法	本文提出的方法
总切火电量/MW	1000	835
总切风电量/MW	580	580
总切负荷量/MW	580	484.3
总直流调制量/MW	400	400
总控制代价/万元	554	475.15
紧急控制策略(序号列表)	[1 9 10 11 12 8 2 4 5]	[1 9 10 11 12 8 2 4 3]
采取紧急控制后暂态稳定裕度/%	80.86	44.68

从表 5 可以看出，本文提出的紧急控制策略优化搜索方法比传统性价比方法减少总切机量 165 MW，减少总切负荷量 95.7 MW，减少总控制代价 78.85 万元。

本文提出的方法与枚举法的效率对比结果如表 6 所示。

表 6 不同搜索方法效率对比

Table 6 Comparison of efficiency between different searching methods

对比项	枚举法	本文提出的方法
搜索次数	17	9

从表 6 中可以看出，采用本文提出的方法得到的紧急控制策略搜索次数比采用枚举法少 8 次，每次搜索的时间主要取决于实施当前紧急控制策略后求取系统的暂态稳定裕度的时间，因此本文提出的方法在效率上有很明显的提升。

通过上述两个算例，都可以很明显地看出，本文提出的基于贪心算法的紧急控制策略搜索方法更优，相对传统性价比方法，减少了紧急控制量，降低了紧急控制成本，也验证了本文提出的基于贪心算法的紧急控制策略优化搜索方法的正确性和有效性。相对于枚举法，明显提升搜索效率。

5　结论

本文基于贪心算法提出了一种紧急控制策略优化搜索方法，通过时域仿真结果，结合 EEAC 理论，得到候选紧急控制空间中每个紧急控制措施的性价比，根据性价比指标确定初始控制策略，并对偏保守的控制策略进行修正，最终得到优化的紧急控制策略。解决了传统性价比方法可能出现控制代价较高的不足，降低了紧急控制代价，提高了电力系统运行的经济性。

全国电网的互联使得电网的安全稳定问题更为凸显，制定合适的紧急控制策略越发困难。本文提出的方法可用于离线紧急控制策略整定和校核，也可为在线预决策紧急控制策略的优化搜索提供一定的参考。通过本文方法搜索出的紧急控制策略可以有效降低紧急控制成本，提高经济效益，为制定稳控措施提供决策依据。

本文主要从暂态功角失稳的角度进行了算例分析和验证，对于电压失稳的分析和控制、更复杂的紧急控制措施比如 FACTS 设备等新型控制手段和直流功率调制以及实际电网中不同紧急控制措施的控制代价还需再进一步的研究。

参考文献

[1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 567-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 567-574.

[2] 郭剑波. 我国电力科技现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 1-7.
GUO Jianbo. Present situation and development trend of power science and technology in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 1-7.

[3] 徐海波, 李雪明, 颜云松, 等. 稳定控制装置故障跳闸判据在特高压交流电网中的应用[J]. 电力系统保护与

控制, 2015, 44(23): 148-153.
XU Haibo, LI Xueming, YAN Yunsong, et al. Application of stability control device fault tripping criterion in UHV AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(23): 148-153.

[4] 徐鹏飞, 马高峰, 高金辉. 微元步长自适应增量电导法实现 MPPT 的控制[J]. 河南师范大学学报 (自然科学版), 2015, 43(1): 59-62.
XU Pengfei, MA Gaofeng, GAO Jinhui. Infinitesimal step adaptive incremental conductance method MPPT control[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 59-62.

[5] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 45(5): 1-9.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 45(5): 1-9.

[6] 李雪亮, 张杰, 王云鹏, 等. 考虑受端励磁系统的交直流稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 9-15.
LI Xueliang, ZHANG Jie, WANG Yunpeng, et al. Stability analysis of HVDC systems considering effects of excitation voltage control of receiving system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 9-15.

[7] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0025-x

[8] LIU Y, NI M, LI Z, et al. Study of the evaluation and design method for the control structure of power system stability control system[C] // International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2015.

[9] 方勇杰. 跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 1-5, 77.
FANG Yongjie. Analysis on trends in emergency control technology of cross-regional interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 1-5, 77.

[10] 杨新伟, 郭彩霞. 基于主频零序功率的配电网故障选线新方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 33-37.
YANG Xinwei, GUO Caixia. A new method of fault line selection for distribution on network based on zero sequence power of the main frequency[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition). 2016, 44(5): 33-37.

[11] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(20): 65-70.
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(20): 65-70.

[12] 高强, 林烨, 黄立超, 等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 33-38.
GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.

[13] 徐泰山, 丁茂生, 彭慧敏, 等. 交直流电力系统暂态安全稳定在线紧急控制策略并行算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 174-180.
XU Taishan, DING Maosheng, PENG Huimin, et al. A parallel algorithm for determining an online emergency control strategy of transient security and stability for AC-DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 174-180.

[14] FANG Yongjie. Reflections on stability technology for reducing risk of system collapse due to cascading outages[J]. Journal of Modern Power System and Clear Energy, 2014, 2(3): 264-271.

[15] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架 (一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.

[16] 范文涛, 方勇杰, 朱昆, 等. 基于面向对象分布式处理的在线预决策紧急控制系统[J]. 电网技术, 1999, 23(8): 1-5.
FAN Wentao, FANG Yongjie, ZHU Kun, et al. An on-line pre-decision emergency control system based on object-oriented processing[J]. Power System Technology, 1999, 23(8): 1-5.

[17] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架——(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 1-10, 106.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10, 106.

[18] LI W, SUN L, ZOU W, et al. Power system reliability analysis system based on PSASP and fault enumeration method and applications[C] // China International

Conference on Electricity Distribution, 2014: 1323-1326.

[19] 赵燕, 张文朝, 李轶群, 等. 电力系统通用安控策略整定方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(4): 102-107.
ZHAO Yan, ZHANG Wenchao, LI Yiqun, et al. Research on the general control strategy of power system tuning method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 44(4): 102-107.

[20] 侯玉强, 崔晓丹, 李威, 等. 用于在线系统的安控策略优化搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 73-76.
HOU Yuqiang, CUI Xiaodan, LI Wei, et al. A new method of searching optimal stability control strategy for on-line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 73-76.

[21] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.

[22] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 25-30, 37.
XUE Yusheng. EEAC and FASTEST[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 25-30, 37.

[23] 周野, 宋晓芳, 薛峰, 等. 电力系统不同形式紧急控制的统一分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 165-171.
ZHOU Ye, SONG Xiaofang, XUE Feng, et al. Unified analysis on different forms of emergency control in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 165-171.

[24] 周野, 宋晓芳. 基于 EEAC 的电力系统紧急切机量快速预估[C] // 中国电机工程学会年会, 2013.
ZHOU Ye, SONG Xiaofang. A fast estimate generation capacity tripped by emergency control for power system based on EEAC[C] // Annual Meeting of Proceedings of the CSEE, 2013.

[25] 高炜欣, 罗先觉, 朱颖. 贪心算法结合 Hopfield 神经网络优化配电变电站规划[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 73-76.
GAO Weixin, LUO Xianjue, ZHU Ying. A new distribution substation planning algorithm based on greedy algorithm Hopfield neural network[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 73-76.

[26] 焦昊, 文云峰, 郭创新, 等. 基于概率有序树的预想故障集贪心筛选算法及其在可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2068-2076.
JIAO Hao, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. A greedy algorithm for contingency screening based on probability ordered tree and its application in reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2068-2076.

收稿日期：2016-11-15；　修回日期：2017-01-12

作者简介：

陈学通(1991—)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制；E-mail: chenxuetong2008@126.com

凌　超(1983—)，男，本科，助理工程师，主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制；E-mail: lingchao@sgepri.sgcc.com.cn

薛　峰(1971—)，男，博士，研究员级高级工程师，主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: xue-feng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑　葛艳娜)