

基于综合贡献度指标的紧急减负荷控制多目标优化方法

徐伟¹, 李群¹, 杨君军², 鲍颜红²

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 南瑞集团公司 国网电力科学研究院, 江苏 南京 211106)

摘要:紧急减负荷控制是应对特高压直流闭锁故障后输电断面潮流越限的重要技术措施。提出一种基于综合贡献度指标的紧急减负荷控制多目标优化方法,考虑可中断负荷对负荷切除总量、用户切除总数这2个目标函数的不同贡献程度,通过并行计算形成分布均匀的 Pareto 解。考虑发电机的二次调频能力计算负荷切除后的系统潮流,采用交流潮流校核输电断面的功率越限量进行修正,求解满足计算精度要求并能够完全消除功率越限量的负荷控制方案。

关键词:紧急减负荷;可中断负荷;多目标优化;功率灵敏度;综合贡献度指标

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.027

0 引言

特高压直流输电为水电、风电及光伏等清洁能源的大规模消纳提供了坚实的基础,可以充分发挥大电网跨区优化配置能源的能力^[1]。特高压直流输电规模的阶跃式提升,导致部分区域电网通过特高压直流输入的电量在供电负荷中的占比越来越高。一旦发生特高压直流闭锁等故障,由其引发的功率缺额极有可能导致局部电网超稳定限额运行,严重情况下可能诱发连锁故障或大范围停电^[2]。由于本地电网调频电源的能力已逐步逼近极限,调节空间不大,而大范围省际电源功率支撑容易引起联络线超限额运行,需要通过紧急减负荷对输电断面的潮流进行控制^[3]。

通过负荷控制系统对电网中非生产性的可中断负荷进行控制,可最大限度地降低大批量负荷切除对用户造成的不良影响,提高特高压直流闭锁后的故障处置能力^[4]。可中断负荷切除后需通过补偿激励引导用户参与电网的调度运行控制,在确保电网安全稳定运行的前提下降低补偿费用^[5]。基于灵敏度分析可得到最经济的切负荷控制策略,但在极端情况下可能需要在单一分区切除大量负荷,导致同一分区切除用户数过多,其他灵敏度较接近的分区无法参与控制,难以兼顾公平性的要求^[6]。因此,在灵敏度相近的情况下,容量相近的用户应同时切除,通过减少用户切除总数进一步降低不良影响。

当负荷切除总量和用户切除总数这2个目标函数相互矛盾时,紧急减负荷控制优化模型的求解则属于多目标优化问题。按算法的复杂程度,多目标规划的求解方法包括约束法、评价函数法、分层序列法和基于有效 Pareto 解的多目标优化方法^[7]。文献[5]采用约束法求解紧急负荷控制的多目标优化问题,将负荷切除总量作为优化目标,将各分区的负荷调整比例系数作为约束条件,选取各分区内部可切容量较大的可中断负荷参与控制。文献[8]通过对切负荷代价、切负荷比例标准差2个目标函数进行归一化处理 and 线性加权,通过评价函数法求解切负荷策略。实际应用中,需事先确定各分区的负荷调整比例系数范围或者目标函数的系数,需要多次求解优化模型才能得到不同参数设置下的切负荷策略。

基于 Pareto 解的多目标优化方法是一个向量优化问题。在采用智能方法如多目标进化算法、非支配遗传算法等求解多目标优化的有效解集时,需要对决策变量进行编码,并定义合适的适应度函数来减少搜索过程中样本的个数^[9]。智能方法还需要多轮迭代才能够不断逼近有效解,迭代次数难以控制且有效解的均匀程度也无法得到保证。紧急减负荷控制的决策空间(可中断负荷的数目)庞大,对求解时间和解的精度均有一定的要求,智能方法显然无法满足在线应用的要求。

为此,本文提出一种基于可中断负荷对多目标函数综合贡献度的紧急减负荷控制优化方法。分别计算可中断负荷对降低负荷切除总量和用户切除总数这2个目标函数的贡献度指标,采用线性加权因子计算可中断负荷对2个目标函数的综合贡献度指标;将线性加权因子分为不同的档位,计算各档位线性加权因子对应的负荷控制方案。根据可中断负荷的有功灵敏度估算负荷切除总量,考虑发电机的二次调频能力计算负荷切除后的系统潮流,采用交流潮流校核输电断面的功率越限量进行修正,逐次

收稿日期:2017-07-03;修回日期:2018-06-06

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2016M591738);
国家电网公司科技项目(面向特高压交直流大受端电网的
大规模负荷精准协调互动控制技术研究)

Project supported by China Postdoctoral Science Foundation
(2016M591738) and the Science and Technology Program of
SGCC(The Large-scale Load Accurate Coordination Interaction
Control Technology Research for UHV AC/DC Large Receiving
End Power Grid)

逼近满足计算精度并能够完全消除功率越限量的负荷控制方案。本文所提优化模型和求解方法根据可中断负荷对目标函数的贡献度指标进行多目标优化,可以给出满足计算精度的有效解集,实现负荷切除总量和用户切除总数的协调优化。

1 多目标紧急减负荷控制的优化模型

1.1 考虑二次调频的潮流计算

发生特高压直流闭锁故障后,电网中存在较大的不平衡功率,在发电机调速器和负荷频率特性的作用下过渡到稳态。由于调速器为有差调节,稳态频率和系统频率的额定值仍存在一定的差异。通过自动发电控制(AGC)调节机组的出力参考值,可以将系统频率恢复到额定值。紧急减负荷控制减少了发生故障后的不平衡功率,有利于系统频率的恢复。在系统功率缺额较大的情况下,AGC 进入紧急控制模式,参与二次调频的机组按各自爬坡率增加出力。因此,有必要在潮流计算过程中考虑二次调频的影响,根据参与二次调频机组的爬坡率和旋转备用分摊系统中的功率缺额。

根据特高压直流闭锁故障后的功率缺额和负荷切除量确定二次调频需要承担的功率缺额 ΔP_{def} :

$$\Delta P_{\text{def}} = \Delta P_{\text{dis}} - \Delta P_{\text{C}} \quad (1)$$

其中, ΔP_{dis} 为特高压直流闭锁导致的功率缺额; ΔP_{C} 为负荷切除总量。

统计系统中具备旋转备用的二次调频发电机台数 N_{AGC} , 根据爬坡率 ξ_{Gk} 确定机组 k 的有功调整量 ΔP_{Gk} :

$$\Delta P_{Gk} = \xi_{Gk} \Delta P_{\text{def}} / \sum_{k=1}^{N_{\text{AGC}}} \xi_{Gk} \quad (2)$$

若某台发电机的出力越上限,则将该发电机的出力固定为额定出力,并从功率缺额中扣除该发电机的旋转备用。将剩余的功率缺额重新分摊至仍具备旋转备用的发电机。重复上述过程,直至不存在出力越限的发电机。

根据二次调频动作后发电机的有功和参与控制可中断负荷的分布情况,确定各节点的注入功率并进行潮流计算:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为节点 i 处发电机的有功和无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 处的有功负荷和无功负荷; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的电压相位差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第 i 行第 j 列元素的实部和虚部。考虑发电机

的二次调频能力分摊功率缺额可以克服常规潮流算法仅靠一个平衡节点承担系统不平衡功率的缺陷,可以更准确地计算特高压直流闭锁故障后的系统潮流分布。

由于式(1)~(3)中未考虑潮流重新分布对系统网损的影响,网损的变化量完全由平衡机承担。可以根据平衡机在潮流计算后的有功和按二次调频动作后目标有功的差额确定网损变化量,将网损变化量叠加到功率缺额中并重新进行潮流计算,实现由二次调频机组分摊网损的变化。

1.2 紧急减负荷控制的优化模型

当系统中出现大规模功率缺额时,在调频特性的作用下发电机的出力增加,可能导致输电断面潮流越稳定限额。紧急减负荷控制通过在各节点设置合理的减负荷量,在满足潮流方程的前提下消除输电断面功率越限。紧急减负荷控制的目标函数为:

$$F = \min[f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})] \quad (4)$$

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i \in N, j \in N_i} x_{i,j} P_{i,j} \quad (5)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{i \in N, j \in N_i} x_{i,j} \quad (6)$$

$$\mathbf{x} = \{x_{i,j}\} \quad i \in N, j \in N_i \quad (7)$$

$$x_{i,j} = \{0, 1\} \quad (8)$$

其中, $x_{i,j}$ 和 $P_{i,j}$ 分别节点 i 的负荷用户 j 参与控制的状态和可切容量; N 为系统中的节点集合; N_i 为节点 i 的可中断负荷集合; f_1 和 f_2 分别为负荷切除总量和用户切除总数,是决策变量的线性函数。

等式约束为式(1)~(3)描述的潮流方程,断面 s 有功 P_s 的不等式约束为:

$$P_s \leq P_{s,\max} \quad (9)$$

其中, $P_{s,\max}$ 为断面 s 的稳定限额。

2 基于综合贡献度指标的多目标优化

当目标函数处于冲突状态时,不存在使所有目标函数同时最优的解,即绝对最优解。因此,多目标优化问题需搜索尽可能完整、分布均匀的 Pareto 解作为决策方案集,然后基于一定的原则、偏好进行最后决策。对于评价函数法而言,其需设置不同的权值并通过多次常规优化才能获取满足精度的 Pareto 解集;对于多目标进化算法而言,其需设置较大的初始样本规模来避免陷入局部最优、保证解的均匀性。

由于切除某个节点的负荷对其他节点的有功灵敏度影响较小,根据可中断负荷对越限断面的灵敏度进行排序,可直接确定负荷切除总量最小的减负荷方案^[10]。在有功灵敏度相同的情况下,可中断负荷容量反映了切除该负荷对降低用户切除总数的贡献程度。因此,可通过线性加权计算可中断负荷对负荷切除总量、用户切除总数这 2 个目标函数的综合贡

献度指标,计算不同线性加权因子下的控制方案。

2.1 控制变量对目标函数的贡献度

计算可中断负荷对目标函数综合贡献度指标的流程如下。

a. 根据可中断负荷对所有过载设备的有功灵敏度,计算可中断负荷的控制性能指标:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^{N_0} \gamma_{ij} \lambda_j \quad (10)$$

其中, γ_i 为可中断负荷 L_i 的控制性能指标; N_0 为过载设备的总数; λ_j 为过载设备 O_j 的负载率; γ_{ij} 为可中断负荷 L_i 对过载设备 O_j 的有功灵敏度。

b. 选取可中断负荷中控制性能指标的最大者为基准值,将可中断负荷的控制性能指标进行归一化处理,计算可中断负荷对降低负荷切除总量目标函数 f_1 的贡献度指标:

$$S_i^E = \gamma_i / \gamma_{\max} \quad (11)$$

其中, S_i^E 为可中断负荷 L_i 对降低负荷切除总量目标函数 f_1 的贡献度指标; $\gamma_{\max} = \max \{ \gamma_i \}$ 为可中断负荷中控制性能指标的最大者。

c. 选取可中断负荷中可控容量的最大者为基准值,将可中断负荷的可控容量进行归一化处理,计算可中断负荷对降低可中断负荷切除总数目标函数 f_2 的贡献度指标:

$$S_i^W = P_i / P_{\max} \quad (12)$$

其中, S_i^W 为可中断负荷 L_i 对目标函数 f_2 的贡献度指标; P_i 为可中断负荷 L_i 的可控容量; $P_{\max} = \max \{ P_i \}$ 为可中断负荷中可控容量的最大者。

d. 采用线性加权因子计算可中断负荷对目标函数 f_1 和 f_2 的综合贡献度指标:

$$S_i^C(\kappa) = \kappa S_i^E + (1 - \kappa) S_i^W \quad (13)$$

其中, $S_i^C(\kappa)$ 为线性加权因子为 κ 时,可中断负荷 L_i 对目标函数 f_1 和 f_2 的综合贡献度指标。

$\kappa = 1$ 对应按控制性能指标由大到小切除可中断负荷的控制方案; $\kappa = 0$ 对应按可切除容量指标由大到小切除可中断负荷的控制方案。另外,步骤 a 中采用断面负载率对控制性能指标进行加权,可以确保越限程度较大的断面优先得到控制。

2.2 给定线性加权因子的控制方案计算

根据可中断负荷对越限断面的有功灵敏度、越限量,确定各断面越限消除对应的切负荷量^[11-12]。在此基础上,根据式(1)~(3)计算负荷切除后考虑二次调频动作的系统潮流。由于采用直流潮流模型确定切负荷量,交流潮流校核得到的断面有功可能存在过控或欠控的问题^[13]。此时,可根据交流潮流校核结果估算直流潮流模型和交流潮流模型的误差 u_i :

$$u_i = \Delta P_{i,1} / \Delta P_{i,2} \quad (14)$$

其中, $\Delta P_{i,1}$ 为根据有功灵敏度计算得到的断面潮流变化量; $\Delta P_{i,2}$ 为控制前后交流潮流计算得到的断面潮流变化量。以断面 S_i 的有功欠控为例,设断面限额为 $P_{i,\max}$,则修正后断面有功的越限量为:

$$\Delta P'_i = u_i (\Delta P_{i,1} - \Delta P_{i,2}) \quad (15)$$

在已有控制方案的基础上,确定断面有功调整量为 $\Delta P'_i$ 时需要追加的切负荷量,通过逐次逼近得到交流潮流校核后断面越限完全消除的控制方案。

3 紧急减负荷策略在线计算流程

切负荷量的变化对调度运行人员的观察更加直观。在切负荷量增加而切除用户数减小的过程中,可以按切负荷量设置计算精度,确保相邻 2 个 Pareto 解的切负荷量差值不大于计算精度。另外,由于控制性能指标对切除用户数也有影响,在 κ 由 1 变化到 0 的过程中有可能会出现切除负荷量和切除用户数均增加的情况。

基于分布式并行计算技术采用同构的计算节点构建大规模集群计算平台,将多个相同的计算任务分配到计算集群的计算节点进行并行计算,是提高在线安全稳定分析计算结论准确性、实时性的主要技术手段^[14]。因此,可将线性加权因子分为不同的档位,分别计算各档位线性加权因子对应的控制方案。

3.1 计算流程

紧急减负荷控制在线计算的流程如下。

a. 在调度中心站获取可中断负荷的可控容量数据并建立可中断负荷与能量管理系统中等值负荷设备的对应关系。

b. 基于状态估计结果和特高压直流闭锁导致的功率缺额,根据式(1)~(3)计算不切负荷时考虑二次调频的故障后潮流,若存在越稳定限额的断面则进入步骤 c; 否则,结束计算。

c. 计算与可中断负荷对应的等值负荷设备对越限断面的有功灵敏度,作为可中断负荷对越限断面的有功灵敏度,将有功灵敏度大于设定门槛值的可中断负荷加入决策空间。

d. 根据集群计算平台的核数将线性加权因子的变化范围平均分为 C 个档位,档位 m 对应的线性加权因子为 $\kappa_m = m / (C - 1)$ ($m = 0, 1, \dots, C - 1$)。

e. 将线性加权因子各档位的控制方案作为计算任务提交给集群计算平台,等待并收集计算结果。

f. 计算各档位的负荷切除总量 E_m 和用户切除总量 W_m ,确定满足 $E_m \leq E_{m+1}$ 且 $W_m > W_{m+1}$ 的有效档位。

g. 对于有效档位,若相邻档位可中断负荷切除总量的差值均小于计算精度 ξ ,则结束计算;否则,执行步骤 h。

h. 根据负荷切除总量差值大于 ξ 的线性加权因子搜索区间确定新增的档位,返回步骤 e。

以档位 t 和 $t+1$ 为例,新增计算方案数为 $M_t = \lceil (E_t - E_{t+1}) / \xi \rceil$ 。档位 t 和 $t+1$ 对应的线性加权因子分别为 κ_t 和 κ_{t+1} ,将搜索区间 $[\kappa_t, \kappa_{t+1}]$ 按 M_t 均分得到新增计算方案的线性加权因子。

i. 根据负荷切除总量和用户切除总数的相对变化率确定最满意解。

3.2 最满意解的选择

在负荷切除总量增加的过程中,有效档位的切负荷用户总数不断减少,但用户切除总数对切负荷总量的相对变化率不断减少。可设置相对变化率的门槛值,选择与该门槛值接近的控制方案作为最满意解。分别计算各有效档位 n 的负荷切除总量的变化量 $\Delta E_n = E_n - E_{n+1}$ 和用户切除总数的变化量 $\Delta W_n = W_{n+1} - W_n$ 。根据式 (16) 计算各档位的相对变化率 k_n :

$$k_n = \Delta W_n / \Delta E_n \quad (16)$$

在电力市场机制下,采用多方竞价的机制进行价格出清,针对负荷容量或电量进行费用结算。在可中断负荷的补偿费用已知的情况下,可用补偿费用最小作为目标函数,代替切除负荷总量最小的目标函数。此时,需要根据可中断负荷的单位容量控制代价和控制性能指标计算控制性价比指标 γ'_i :

$$\gamma'_i = \gamma_i / c_i \quad (17)$$

其中, γ_i 为根据式 (10) 计算得到的控制性能指标; c_i 为可中断负荷的单位容量控制代价。

4 算例分析

本文以 IEEE 39 节点系统和某实际电网作为算例验证本文所提优化模型和求解算法。

4.1 IEEE 39 节点系统

选取线路 16-15 作为需要控制的输电断面,潮流方向为由首端流向末端。将对输电断面灵敏度为正的节点组成的区域作为受电区域,图 1 给出了系统的接线图和受电区域。

通过 MATLAB 生成 $[0, 1]$ 之间的 600 个随机数,在节点 7—9、12、14 和 15 分别设置 100 个随机数作为可中断负荷的容量。

a. 发电机切除后的潮流分布。

通过切除受电区域内节点 32 关联的发电机模拟发生故障后的功率缺额,表 1 给出了各发电机的容量、爬坡率和故障前/后的有功。

受电区域的功率缺额为 650 MW,备用容量(发电机 G_{31} 和 G_{39})仅为 77.20 MW。因此,功率缺额主要由送电区域的发电机承担,发电机切除前断面的有功为 260.51 MW,切除后断面的有功为 530.52 MW。通过在功率分摊过程中同时考虑容量和爬坡率的影响可以更加准确地计算故障后的潮流分布。

根据故障后的系统运行方式计算可控负荷节点的有功灵敏度并统计可切容量,见表 2。

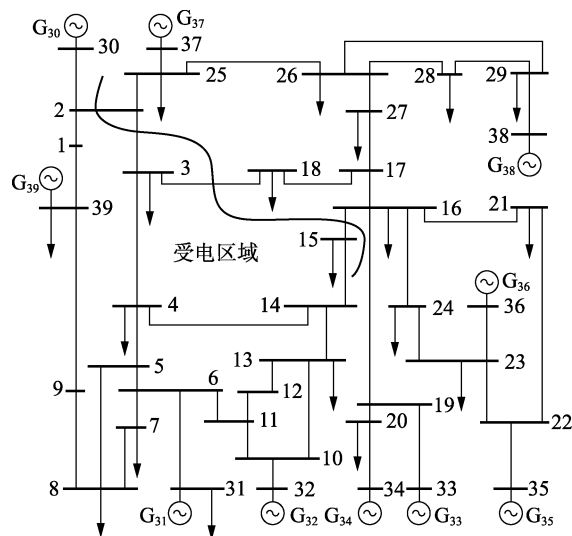


图 1 IEEE 39 节点系统

Fig.1 IEEE 39-bus system

表 1 发电机参数和故障前/后的有功

Table 1 Parameters and active power before and after fault of generators

机组	容量/ MW	爬坡率/ (MW·s ⁻¹)	故障前 有功/MW	故障后 有功/MW
G ₃₀	350	5	250	327.87
G ₃₁	650	8	572.8	650.00
G ₃₂	650	4	650	—
G ₃₃	650	1	632	647.57
G ₃₄	1 000	7	508	617.02
G ₃₅	1 000	5	648.88	748.69
G ₃₆	650	8	560	650.00
G ₃₇	650	7	540	649.02
G ₃₈	1 000	6	830	923.45
G ₃₉	1 000	5	1 000	1 000.00

表 2 可控负荷节点灵敏度和可切容量

Table 2 Sensitivity and cut-off capacity of controllable load nodes

节点	有功/MW	无功/Mvar	有功灵敏度	可切容量/MW
7	233.8	84	0.240 2	52.80
8	422	143	0.235 3	46.74
9	100	33	0.169 1	50.44
12	108	125	0.289 6	47.83
14	100	48	0.335 7	48.29
15	220	105	0.593 1	50.10

b. 多目标优化计算结果。

将断面限额设置为 490 MW,断面的有功越限量为 40.52 MW。不考虑可中断负荷容量(对应 $\kappa=1$)时,将各负荷节点关联的可中断负荷分别按可切容量由大到小排序,确定用户切除总数。此时,负荷切除总量和用户切除总数分别为 57.47 MW 和 108,节点 15 和 14 的可中断负荷参与了控制。在 $(0, 1)$ 的范围内按 0.1 的步长,分别计算各线性加权因子对应的负荷切除总量和用户切除总数;针对切负荷用户总数变化较大的 $(0.2, 0.3)$ 范围内按 0.01 的步长进行计算。表 3 给出了各线性加权因子对应的计算结果。

表3 各线性加权因子对应的计算结果

Table 3 Calculative results corresponding to different linear weighting factors

加权因子	切负荷量/MW	切负荷数	加权因子	切负荷量/MW	切负荷数
0.1	57.47	108	0.21	57.47	108
0.2	57.47	108	0.22	57.47	108
0.3	60.21	91	0.23	57.54	107
0.4	64.49	84	0.24	57.62	105
0.5	71.11	83	0.25	57.72	104
0.6	76.10	86	0.26	57.79	99
0.7	81.09	90	0.27	58.05	95
0.8	84.21	93	0.28	59.07	92
0.9	87.94	97	0.29	59.61	91

将可控节点按有功灵敏度排序,节点15的有功灵敏度为0.593 1,节点14的有功灵敏度为0.335 7。因此,在 $(0, 0.22]$ 范围内, κ 的变化对负荷切除总量和用户切除总数没有影响。在 $(0.22, 0.5]$ 范围内,节点14、12、7和8中容量较大的可中断负荷取代了节点15中容量较小的可中断负荷,用户切除总数下降而负荷切除总量增加。在 $(0.5, 0.9]$ 范围内,节点9中容量较大的可中断负荷参与控制,但是由于该节点的有功灵敏度远小于节点15,用户切除总数和负荷切除总量均增加。

在 $(0.22, 0.3)$ 范围内,由于节点14和12的灵敏度比较接近,2个节点的可中断负荷同时参与控制;在 $(0.22, 0.5)$ 范围内,由于节点7和8的灵敏度比较接近,2个节点的可中断负荷同时参与控制。考虑可控负荷容量后,可以确保灵敏度相近的负荷同时参与控制,更符合调度人员的操作习惯。

当 κ 为0.3、0.4、0.5时,相对变化率分别为0.16 MW/户、0.61 MW/户和6.62 MW/户。当 $\kappa=0.5$ 时,少切除一个用户,则负荷切除总量增加6.62 MW,经济代价显著增加。因此,选取 $\kappa=0.4$ 对应的控制方案作为最终的控制方案。考虑参与控制的可中断负荷,系统的功率缺额为585.51 MW,控制后输电断面潮流为489.57 MW。

4.2 实际电网仿真

选取某电网的实际运行方式进行分析,局部电网地理接线图见图2。特高压直流输电功率为4 902 MW,输电断面ML-MD的稳定限额为3 000 MW,故障前有功为1 437 MW,故障后有功为3 146 MW,图2虚线框中受电区域可控容量为424 MW。

将计算精度设置为25 MW,配置并行计算的CPU核数为24个,通过2轮计算得到满足计算精度的Pareto解,单个负荷控制方案的计算耗时最长为1.73 s,总计耗时为3.37 s。图3给出了满足计算精度的Pareto解的分布情况。

将可中断负荷按综合贡献度指标排序后可以直接估算切负荷量,通过交流潮流校核逼近完全消除越限的切负荷量,计算耗时主要是潮流计算的时间。

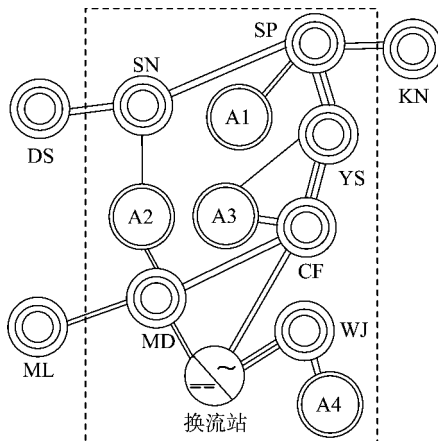


图2 局部电网地理接线图

Fig.2 Geographical wiring diagram of partial power grid

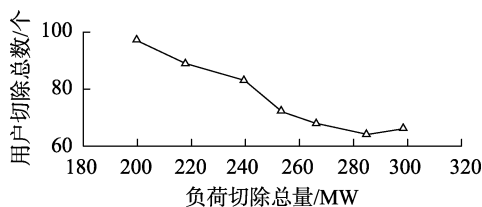


图3 Pareto解的分布情况

Fig.3 Distribution of Pareto solutions

通过并行计算可以同时计算多个线性加权因子对应的负荷控制方案,对不满足精度要求的计算范围进行细化,可以有效地减少计算方案数。根据Pareto解的分布情况,可以为调度运行人员确定最终的控制方案提供更多的决策信息。

5 结论

本文通过计算可中断负荷对多目标函数的综合贡献度指标,对降低负荷切除总量和降低用户切除总数这2个目标进行协调优化,给出满足计算精度的有效解集;在电网中出现断面越限且无法通过增加发电机出力来消除越限时,在线进行切除可中断负荷的控制策略计算,为调度运行人员进行事故处置提供技术支撑。仿真结果表明,本文所提优化模型和求解方法能够充分考虑大规模功率缺额下发电机的二次调频能力对系统潮流分布的影响;通过将复杂的多目标优化问题分解为控制方案计算和潮流校核计算2个子问题,显著降低了问题的求解规模。

参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7):1-10.
- [2] 韩冰,孙世明,赵家庆,等. 适应特高压直流闭锁故障处置的批量负荷快速控制关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):177-183.
HAN Bing, SUN Shiming, ZHAO Jiaqing, et al. Key technologies for

- high speed batch control of load dispatching adapt to block fault disposal of UHVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 177-183.
- [3] 高强, 张小聪, 施正钗, 等. ± 800 kV 宾金直流双极闭锁故障对浙江电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 47-51. GAO Qiang, ZHANG Xiaocong, SHI Zhengchai, et al. Impact of ± 800 kV Yibin-Jinhua DC bipolar block fault on Zhejiang Power Grid[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 47-51.
- [4] 陈庆, 闪鑫, 罗建裕, 等. 特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 147-152. CHEN Qing, SHAN Xin, LUO Jianyu, et al. Source-grid-load coordinated control strategy and its application under UHVDC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 147-152.
- [5] 尹积军. 支持特高压互联电网安全运行的供需友好互动技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5715-5723. YIN Jijun. Research on load friendly interactive technology for safe operation of UHV interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5715-5723.
- [6] 徐泰山, 李峰, 张建新, 等. 各类紧急减负荷控制的在线风险评估和协调决策方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 91-97. XU Taishan, LI Feng, ZHANG Jianxin, et al. Online risk assessment and coordinated decision scheme for emergency load shedding control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 91-97.
- [7] 乔辰, 张国立. 几何加权法求解多目标规划问题[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(6): 107-110. QIAO Chen, ZHANG Guoli. Geometric weighting method for solving multi-objective programming problems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(6): 107-110.
- [8] 陈庆, 周海强, 朱斌, 等. 协调经济性及事故评级的紧急减负荷控制优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1044-1050. CHEN Qing, ZHOU Haiqiang, ZHU Bin, et al. Coordinated emergency load shedding control optimization algorithm for economic cost and accident assessment[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1044-1050.
- [9] 侯建朝, 胡群丰, 谭忠富. 计及需求响应的风电-电动汽车协同调度多目标优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 22-27. HOU Jianchao, HU Qunfeng, TAN Zhongfu. Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 22-27.
- [10] 王韶, 刘沛铮, 董光德, 等. 基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 162-168. WANG Shao, LIU Peizheng, DONG Guangde, et al. Power system cascading failure model based on complex network theory with consideration of corrective control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 162-168.
- [11] 姚峰, 张保会, 周德才, 等. 输电断面有功安全性保护及其快速算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 31-36. YAO Feng, ZHANG Baohui, ZHOU Decai, et al. Active power security protection of transmission section and its fast algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 31-36.
- [12] 周晓宁, 徐伟, 胥传普, 等. 计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 61-66. ZHOU Xiaoning, XU Wei, XU Chuanpu, et al. The assistant decision-making for power grid equipment overloading considering load transfer actions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 61-66.
- [13] 马明, 刘强, 沈凤杰, 等. 输电设备过载与断面功率越限在线控制决策[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 26-32. MA Ming, LIU Qiang, SHEN Fengjie, et al. On-line auxiliary decision-making for overload control of power transmission equipment and sections[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 26-32.
- [14] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35. BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35.

作者简介:



徐伟

徐伟(1982—),男,江苏宿迁人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: 125481905@qq.com);

李群(1967—),男,江苏靖江人,研究员级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统优化运行与控制;

杨君军(1983—),男,山东临沂人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。

Multi-objective optimization method for emergency load shedding based on comprehensive contribution index

XU Wei¹, LI Qun¹, YANG Junjun², BAO Yanhong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: Emergency load shedding is an essential technical measure against the power flow violation-limit of transmission section caused by the blocking faults of UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current). A multi-objective optimization method for emergency load shedding based on comprehensive contribution index is proposed, which considers the different contribution degrees of interruptible load on the objective functions of the total load shedding capacity and the total quantity of load shedding customers and forms well-distributed Pareto solutions by parallel calculation. The power flow after load shedding is calculated considering the secondary frequency regulation of generators and the over-load of transmission section is corrected by the AC power flow check, obtaining the load shedding scheme, which meets the requirements of calculation precision and can fully eliminate the over-load.

Key words: emergency load shedding; interruptible load; multi-objective optimization; power sensitivity; comprehensive contribution index