基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制

任建文1,魏俊姣2,谷雨峰1

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;2. 国网莆田供电公司,福建 莆田 351100)

摘要:为了克服传统优化算法存在的计算量大以及参与调整的设备过多等不足,首先识别对节点增加的注入 功率敏感的脆弱线路,并将其与重新定义的重载线路共同构成敏感线路集作为控制算法的约束条件;然后根 据线路负载率以及灵敏度得到各节点的综合灵敏度,剔除作用微小的控制变量,以实现优选参与调整的设 备,进一步减少计算量;最后,为了实现在满足尽可能少切负荷的同时做到参与调整的设备较少,建立基于多 目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制方法。IEEE 9节点和 IEEE 39节点标准系统算例结果说明所 提方法有效可行。

0 引言

近年来频繁发生的大停电事故使人们深刻地认 识到:在网架结构越来越复杂的大规模电网中,由于 某些过载线路退出运行导致潮流转移而引起的连锁 跳闸事故的发生概率正不断增大:再坚强的网架结 构也无法代替紧急控制。大停电事故带来的巨大经 济损失和严重社会影响,使得研究如何采取紧急控 制措施快速消除过载日益迫切[1-2]。在电力系统中, 当线路有功功率出现越限时,研究如何调整发电机 和负荷有功功率使得线路过载解除,属于有功安全 校正控制^[3]。到目前为止,得到学者的普遍认可的控 制算法主要有:灵敏度算法[4-6]和优化算法[7-9]。其中, 灵敏度算法在算法复杂度和收敛方面表现出明显优 势,但其在综合考虑调整措施对其余支路的影响方 面仍存在较大的局限性,可能导致系统在调整后出 现新的过载现象。相反,优化算法通过求解数学模型 得到调整方案,调整结果更符合电网安全运行的要求。 随着粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization) 算法在电力系统优化控制方面的不断运用.文献[7] 将优化问题中的功率平衡等式转化为节点的不平 衡功率,并把它作为优化目标处理,利用信息充分 交流的粒子群优化算法进行求解,通过对标准算例 的仿真,证明了粒子群优化算法在过负荷控制方面 存在显著的优势。但因其缺少对约束条件和控制变 量的处理,所需的调整设备涉及到所有发电机,难 以满足实时紧急控制的要求。

为此,本文首先确定连锁跳闸预防控制算法的 基本原则,接着在分析粒子群优化算法存在计算量

收稿日期:2014-12-11;修回日期:2016-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50837002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50837002)

大以及参与调整的设备过多等不足之处后,针对性 地有效提高优化算法的实用性。最后对单线路过载 的简单系统和多线路过载的复杂系统进行仿真,结 果表明算法能同时达到尽可能少地切负荷和参与 调整设备较少的双目标。

1 连锁跳闸预防控制的基本原则与改进措施

2011 年出台的 599 号令提出将电网减供负荷 量或停电用户数作为事故等级划分的主要评定指 标,指出稳控系统切负荷等同于故障损失负荷^[11]。因 此,在今后预防连锁跳闸控制处理中必须做到在保证 电网安全稳定的前提下尽可能少切或不切负荷,算 法应满足以下要求:

(1)算法在任何情况下都能可靠收敛:

(2)所采取的控制措施应确保在调整发电机出 力无法消除过载后才进行负荷切除:

(3)计算速度应满足在线紧急控制的需求:

(4)满足预防连锁跳闸控制的计算精度要求,避 免出现过控或欠控。

为了满足要求(2),本文提出建立优化算法的第 一个目标函数 f_1 ,确保算法在调整发电机出力无法消 除越限时才进行负荷切除。与此同时,考虑到各个负 荷节点中的重要负荷,设置负荷节点最大切除值不 超过各节点的第Ⅲ类负荷量。为了提高算法的计算 量,首先通过形成敏感线路集,减少计算过程中约束 条件的阶数,并根据节点的综合灵敏度,优选参与计 算的控制节点,最后通过第二个目标函数 f_2 进一步 减少参与调整的设备。值得注意的是,为了提高计算 速度,学者大多采用基于直流模型得到的灵敏度,这 牺牲了一定的计算精度,极有可能导致调整出现欠 控或者过控。针对要求(4),本文提出灵敏度的误差 补偿系数 α 和 $\beta(\alpha>1,\beta<1),以保证过载线路的切$ 除量等于 $\alpha\Delta P_{m_g}$,而敏感线路集中的线路的调整 量应小于 $\beta\Delta P_{n_r}$,其中 ΔP_{m_g} 为过载线路m的过载 量, ΔP_{n_r} 为敏感线路n的冗余量。下文将详细介绍 敏感线路集的形成、综合灵敏度的计算和控制算法 的模型。

2 敏感线路集

2.1 脆弱线路的识别

在电力系统中,当机组 *i* 有功增加 1 个单位时, 支路 *l*(线路的首、末节点分别为 *s*、*t*)的有功功率变 化量即为支路 *l* 有功功率对机组 *i* 有功的灵敏度 *S*_{*l*,*i*},定义式如下:

$$S_{l,i} = \frac{X_{si} - X_{li}}{\kappa} \tag{1}$$

其中, X_{si} 为当前状况下网络节点阻抗矩阵第s行i列元素, X_{u} 类似; x_{st} 为支路l的电抗。

本文将线路 *l* 在节点注入功率增加时分担功率 的大小,即线路 *l* 对各节点的灵敏度定义为线路 *l* 所 受到的冲击。由此可知,线路受到的潮流冲击可分为 全局冲击和局部冲击,其中全局冲击为线路受到的 来自每一节点波动引起的潮流冲击在线路上的叠 加,局部冲击为线路受到的来自节点波动引起的最 大冲击^[12]。全局冲击和局部冲击的定义式分别如 式(2)和式(3)所示。

$$C_{l_{-1}} = \sum_{i \in G} \Delta P_i S_{l,i} \tag{2}$$

$$C_{l_2} = \max_{i \in \mathcal{C}} (\Delta P_i S_{l,i}) \tag{3}$$

其中,G 为发电机集合,因为在发电机出力无法消除 过载时才进行负荷切除,所以本文暂不考虑调整负 荷节点带来的冲击;ΔP_i为发电机 i 的可调节容量。 由 C_l 和 C_l 的定义可知,线路 l 对机组 i 的灵敏度 越大,机组 i 可调节容量 ΔP_i 越大,线路所受到的全 局冲击和局部冲击越大。

为了综合考虑线路所受到的冲击,本文首先将 全局冲击和局部冲击按式(4)进行归一化处理,再由 式(5)得到线路1的脆弱性指标 C_l。

$$X^* = \frac{X - X^{\min}}{X^{\max} - X^{\min}} \tag{4}$$

$$C_{l} = \frac{1}{2} (C_{l-1}^{*} + C_{l-2}^{*})$$
(5)

分析式(2)—(5)可知,脆弱性指标 C_l能够有效 地搜索出在调整过程中容易受影响的线路,同时指 标的计算仅与网络拓扑结构有关,因而脆弱线路的 识别可周期进行,无需在线实时计算。

2.2 敏感线路集

传统灵敏度算法缺少考虑调整对系统其余线路 的影响,如果此时调整对过载线路和其余线路的作 用相反,系统整体的过载量反而增加,调整时间更 长,调整量更大。另一方面,综合考虑调整措施对系 统所有线路影响的优化算法,由于实际系统的规模 非常大,支路数目庞大,约束条件过多,而导致计算 速度在满足在线应用要求方面略显吃力。

为了考虑调整对其余线路的影响,文献[6]提出 了关键线路集的概念,其包含线路负载率大于 90% 的重载线路以及组成过载线路输电断面的其余线 路。不可否认,关键线路集在很大程度上解决了以往 灵敏度算法中的潮流约束条件问题,但通过深入分 析不难发现,关键线路集存在以下问题。

(1)并未考虑到过载线路的过载量,而是简单地将负载率大于 90 % 的线路定义为重载线路。当系统过载线路的过载量较大时,就会出现重载线路的考虑范围过小,导致某些负载较大的线路在调整后出现新的过载现象。针对此,本文将重载线路重新定义为冗余量小于 Σ ΔP_{m_g}的线路,其中 gline 为系统的过载线路集。

(2)为了考虑调整对系统其余轻载线路的影响, 文献[6]提出关键线路集包含过载线路的输电断面。 这虽然能预防某些轻载线路在调整后出现过载现 象,但对于大规模电网而言,计算量较大的输电断面 搜索,无疑使得算法的速度大打折扣,尤其当存在多 条过载线路,就需要进行多次的输电断面搜索。为了 解决这个问题,本文将离线计算得到的受节点功率 变化敏感的脆弱线路代替输电断面搜索。

综上,为了减少约束条件的阶数,节省计算时间,本文结合关键线路集的优点,扬长避短,将重载 线路与脆弱线路组成的敏感线路集作为优化算法的 约束条件,克服了以往优化算法未对控制过程中的 约束条件进行筛选而导致计算量过大的问题。

3 控制参与调整的设备数

3.1 控制参与调整设备数的可行性分析

一般情况下,连锁跳闸预防控制的目标函数和 参与调整的设备数关系如图1所示^[14]。其中,N_{min}为 实现连锁跳闸预防控制所需的最小调整设备数,N_{max} 为系统可参与调整的最大设备数。由图1可知,当调 整的设备数为 N_e,预防控制就可达到较优的调整效 果,再增加参与调整的设备数 N(N>N_e)也无法取得



Fig.1 Relationship between objective function and regulating equipment amount

64

更好的优化效果。因此,在算法设计中,限制参与调整的设备具有原理上的可行性。与此同时,当系统的某线路出现过载时,工作人员必须在保护动作之前这一有限的时间内,消除线路的过载量,如果参与调整的设备较多,工作人员的操作难度无疑将大幅增加,因此限制参与调整设备数还具有原则上的必要性。为此,本文首先通过计算各节点的综合灵敏度来提出调整效果微小的设备,接着利用目标函数 f₂实现优选参与调整设备数少的调整方案。

3.2 综合灵敏度

以往的优化算法并未考虑到各节点对消除过载 的作用大小,直接将所有节点作为控制变量参与计 算,计算量偏大。然而在实际电力系统中,对消除线 路过载真正有效的控制节点并不多。因此为了使控 制算法的执行更加快速有效,应先将节点按照对消 除线路过载作用的大小进行排序,剔除作用不大的 控制变量。在此给出对控制节点进行优选的原理:首 先,消除线路的过载量是首要任务,线路的过载量越 大,对消除过载的需求越迫切,该线路对应的权重越 大,可消除过载的需求越迫切,该线路对应的权重越 大。与此同时,其余线路的潮流约束也应该且必须得 到满足,线路的负载率越大,在调整中过载的概率越 大。因此,将节点对过载线路和敏感线路的灵敏度加 权和定义为节点的综合灵敏度,权重由各线路负载 率决定。

$$S_i = 1.5 \sum_{m \in g_{\text{line}}} S_{m,i} \frac{P_m^0}{P_m^{\text{max}}} + \sum_{n \in m_{\text{line}}} S_{n,i} \frac{P_n^0}{P_n^{\text{max}}}$$
(6)

其中, m_{line} 为系统的敏感线路集; P_m^0 、 P_m^{mx} 分别为过载 线路 m 的传输功率和允许的最大传输功率; P_n^0 、 P_n^{mx} 分别为敏感线路 n 的传输功率和允许的最大传 输功率; S_i 为节点 i 的综合灵敏度。

由上式可知,节点*i*的综合灵敏度*S*_i越大,它对 过载线路和敏感线路的综合调整效果就越明显。综 合灵敏度*S*_i不仅考虑到节点*i*对系统过载线路的灵 敏度,同时考虑了调整节点*i*对敏感线路的影响,能 够在一定程度上防止其余线路在调整后出现过载。 为了减少计算量,在得到节点综合灵敏度后,本文剔 除综合灵敏度较小的节点数为所有节点数的 30%, 当系统的过载量较大时,可以相应地减少剔除的节 点数。

综上所述,本文所提的紧急控制方法,由于优选 了参与调整的控制变量以及限制了计算过程中的无 效功率约束条件,可以有效地减少算法的计算量。对 于大规模电网而言,可以通过选择对消除功率越限 问题真正有效的少量控制节点作为算法的变量,并 将在调整过程中功率变化较大的敏感线路(同样是 少数)作为约束条件,由此算法的计算量得到大幅减 小,计算速度有了较大的提高,为控制措施的实施争 取时间。

4 基于粒子群优化算法的紧急控制措施求解

4.1 优化算法的数学模型

综合 1—3 节的分析,本文算法的基本原理为:在 得到系统的敏感线路集和各节点综合灵敏度之后, 建立满足尽可能减少负荷损失的目标函数 f₁ 以及确 保参与的调整设备尽可能少的目标函数 f₂。同时为 了减少直流灵敏度计算误差可能带来的欠控或过控 问题,在潮流约束条件中引入误差补偿系数 α 和 β。 基于多目标粒子群优化算法的控制模型如下:

$$F = \min(f_{1}, f_{2})$$

$$\left| f_{1} = \sum_{i \in G^{-}} \left| \Delta P_{G^{-}, i} \right| + \sum_{j \in G^{+}} \left| \Delta P_{G^{+}, j} \right| + \gamma \sum_{k \in L^{-}} \left| \Delta P_{L^{-}, k} \right|$$

$$\left| f_{2} = N, \stackrel{\text{def}}{\to} \Delta P_{G^{-}, i} \neq 0 \text{ gt } \Delta P_{G^{+}, j} \neq 0 \text{ gt } \Delta P_{L^{-}, k} \neq 0 \text{ ft } , N = N + 1$$

$$(8)$$

$$\sum_{i \in G^{-}} \Delta P_{G^{-},i} - \sum_{j \in G^{+}} \Delta P_{G^{+},j} - \sum_{k \in L^{-}} \Delta P_{L^{-},k} = 0$$
(9)

$$\sum_{i \in G^-} S_{m,i} \Delta P_{G^-,i} - \sum_{j \in G^+} S_{m,j} \Delta P_{G^+,j} - \sum_{k \in L^-} S_{m,k} \Delta P_{L^-,k} = \alpha \Delta P_{m_{g^-}}$$
(10)

$$\sum_{j \in G^*} S_{n,j} \Delta P_{G^*,j} + \sum_{k \in L^-} S_{n,k} \Delta P_{L^-,k} - \sum_{i \in G^-} S_{n,i} \Delta P_{G^-,i} \leqslant \beta \Delta P_{n_r}$$
(11)

$$0 \leq \Delta P_{G,i} \leq P_{G,i}^{0} - P_{G,i}^{0}$$

$$\tag{12}$$

$$0 \leq \Delta P_{G^*,j} \leq P_{G^*,j}^{\text{res}} - P_{G^*,j}^{\text{res}}$$

$$(13)$$

$$0 \leq \Delta P_{ee} \leq P_{ee} \leq m$$

$$(14)$$

$$\mathbf{J} \leqslant \Delta P_{L^{*},k} \leqslant P_{L^{*},k,\mathbb{H}} \tag{14}$$

$$m \in g_{\text{line}}, n \in m_{\text{line}}$$
 (15)

其中,G⁻、G⁺ 以及L⁻ 分别为减出力机组、加出力机 组以及切负荷点组集合;P_{L,k,II} 为负荷节点 k 的第 II 类负荷。为了尽量避免切负荷,式(8)中的函数f₁在 负荷切除量前加了一个较大的惩罚系数γ,函数f₂则 是为了优选调整设备数少的方案。式(9)是为了保证 加减出力平衡而设的等式约束条件。式(10)和式 (11)是为确保在消除过载的同时不产生新的过载线 路而列的约束条件;因为基于直流模型计算的灵敏 度误差小于 10%,故取误差补偿系数α=1.1,β=0.9, 同时,误差补偿系数的引入还能保证系统各线路在 调整后仍具有一定冗余量,降低线路在小干扰下出 现新过载现象的可能性。式(12)—(14)是为了保证 发电机加减出力和负荷的切除量不超过极限。

4.2 基于粒子群优化算法的控制模型求解

粒子群优化算法是基于群体智能理论的随机寻 优算法,由美国学者 Kennedy J和 Eberhart R C 受 鸟群觅食行为的启发而提出。粒子群优化具有依赖 经验参数少、收敛速度快、优化性能良好的优点,且 原理简单,适合求解需要满足一定精度和速度要求 的电力系统组合优化问题。因此本文通过采用粒子 群优化算法来求解连锁故障预防控制模型得到紧急 控制方案。粒子群优化算法的基本过程如下。

假设一个粒子群体中共有 M 个微粒,在 J 维空间坐标系中每个粒子的位置可以表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ii}, \dots, x_{ii})$,其中 $i = 1, 2, \dots, M$,粒子的速度表示为

 $\mathbf{v}_{i}=(v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{ij},\cdots,v_{ij})$ 。粒子群优化算法各粒子速 度和位置按下式进行更新。

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)]$$
(16)

$$v_{i,j}(t+1) = \begin{cases} v_{\max} & v_{i,j}(t+1) > v_{\max} \\ -v_{\max} & v_{i,j}(t+1) < -v_{\max} \end{cases}$$
(17)

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1)$$
(18)

其中, $v_{i,j}$ 为第 i 个粒子的第 j 维速度分量,对应紧急 控制中各节点输入功率在每次迭代中的改变量; v_{max} 为粒子最大速度,为各节点输入功率单次调整最大 量; $x_{i,j}(t)$ 为第 i 个粒子的第 j 维位置分量,对应于系 统各节点在第 t 次迭代后的总调整量; ω 为惯性权重 因子; c_1 和 c_2 为正加速常数; r_1 和 r_2 为在区间[0,1] 均匀分布的随机数; $p_{i,j}$ 为第 i 个粒子的第 j 个分量 的最优位置; $p_{e,i}$ 为粒子群体最优位置的第 j 个分量。

由式(16)—(18)可知,粒子在运动过程中根据 自身最优位置以及群体最优位置更新运动速度和运 动方向。如此,当全局最优解不在根据式(16)得到的 优化路径上时,粒子就无法有效搜索到全局最优解, 而将过早收敛于某个局部最优解。此时,如果粒子 能向其他优化的方向运动,就可有效防止过早收敛。 为此本文采用基于适应值距离比的改进粒子群优 化 FDR-PSO(Fitness Distance Ratio-Particle Swarm Optimization)算法^[18]。

相对于基本粒子群优化算法,FDR-PSO 算法的 粒子 *i* 速度的更新不仅根据自己的历史最优位置和 群体最优位置,同时每个粒子也向比自己有更好适 应值的一个相邻粒子 *n* 学习。相邻粒子 *n* 的选择应 该满足:粒子 *n* 必须位于粒子 *i* 附近且粒子 *n* 的适应 值优于粒子 *i*。

要得到符合上述要求的粒子最简单的方法就是 搜索具有最大适应值距离比的粒子 $p_{n,j}$,其中粒子i的第i维最大适应值距离比定义如下:

$$p_{n,j} = \max\left(\frac{F(m) - F(i)}{|x_{m,j} - x_{i,j}|}\right)$$
(19)

其中,F(i)、F(m)分别为第i个粒子和第m个粒子的 适应值; $x_{i,j}, x_{m,j}$ 分别为第i个粒子和第m个粒子的 第j维位置,则 $|x_{m,j}-x_{i,j}|$ 表示 2个粒子在第j维的 距离。

在得到最大适应值距离比的粒子后,FDR-PSO 算法的第*i*个粒子的第*j*维速度更新受以下 3 个要 素影响:

(1)粒子i自身的历史最优位置 $p_{i,j}$;

(2)粒子群体最优位置 $p_{g,j}$;

(3)"最好邻居"的历史最优位置 $p_{n,j\circ}$

因此,FDR-PSO 算法的粒子更新位置由式(16) 变为式(20)。

 $v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] +$

 $c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)] + c_3 r_3 [p_{n,j} - x_{i,j}(t)]$ (20) 其中, c_3 为正加速常数; r_3 为在区间[0,1]均匀分布 的随机数。

综上,本文所提的基于粒子群优化算法的连锁 跳闸预防控制的基本步骤如图2所示。



图 2 算法流程图 Fig.2 Flowchart of algorithm

5 算例分析

为了验证所提算法的有效性,本文采用新英格 兰 IEEE 9 节点和 IEEE 39 节点标准系统作为研究 算例,并通过 Power World 仿真软件对调整方案进 行验证,所得结果说明本文算法不仅对单线路过载 的简单系统有效,同时对多线路过载的大系统也能 做到可靠有效。

5.1 IEEE 9 节点单线路过载控制结果分析

IEEE 9 节点标准系统共有 3 台发电机、9 个节 点、3 台变压器和 6 条线路,拓扑结构如图 3 所示。 假设除了线路 4-7 的额定容量为 50 MW 外,其余 线路的额定容量均为 70 MW;发电机 G₁、G₅、G₉ 的额 定容量分别为 150 MW、200 MW、100 MW(当前发电 量分别为 105.6 MW、163 MW、85 MW)。



图 3 IEEE 9 节点系统接线图 Fig.3 Wiring diagram of IEEE 9-bus system 表 1 为在某一运行方式下, IEEE 9 节点系统过

载线路和敏感线路的潮流分布情况,线路 4-7 的过载 量为 13.7 MW,所设控制目标为将线路 4-7 的功率控 制在 50 MW 以下。表 2 为过载线路以及敏感线路对 系统部分节点的灵敏度以及节点综合灵敏度。由本文 算法得到的控制措施为:发电机 G₁ 加出力 6.19 MW, 发电机 G₉ 加出力 8.5 MW,发电机 G₅ 减出力 24.0 MW, 同时负荷 L₇ 切除 9.35 MW。由表 1 可知,调整后线 路 4-7 的功率成功地控制在 46.6 MW,同时系统其 余线路也均处于安全范围,可见算法可以有效地对 单线路过载进行控制。

表 1 过载线路以及敏感线路潮流情况

Table 1 Power flow of overload lines

	and sensitive lines			
支路	调整前潮流	安全极限	冗余量	调整后潮流
4-7	63.7	50	-13.7	46.6
3-4	63.0	70	7.0	56.3
2-6	62.5	70	7.5	68.4
6-8	47.3	70	22.7	44.3

表 2 过载线路以及敏感线路对部分节点的灵敏度

Table 2 Sensitivity of overload lines and sensitive lines to some nodes

- 井 占		各支路对应灵敏度				
지막	4-7	3-4	2-3	6-8	小百火纵反	
1	0.0475	-0.1853	0.2076	-0.1290	-0.0648	
5	0.3906	0.4869	-0.3967	0.2278	0.9863	
9	-0.3367	0.244 0	-0.1821	0.4619	-0.2654	
3	0.1759	-0.2639	-0.6468	-0.0057	-0.5786	
6	-0.0879	-0.0022	0.0999	-0.2672	-0.2613	
7	-0.4887	0.4065	-0.3472	0.3447	-0.5965	

5.2 IEEE 39 节点多线路过载控制结果分析

IEEE 39节点标准系统共有 10 台发电机、39 个 节点、12 台变压器和 34 条线路,拓扑结构如图 4 所 示。为了验证算法的有效性,将实验结果与文献[8] 所提算法、单目标优化算法分别进行对比分析。按文 献[8]的验证方法,设置线路 16-17、线路 24-23 同 时在线路长时间过载后退出运行,引起潮流的再分 配,而导致线路 22-21 和线路 21-16 出现不同程度 的过载现象,以此验证方法在预防连锁跳闸控制方 面的实用性。其中假设除了线路 22-21 的额定容量 为 870 MW 外,其余线路的额定容量均为 610 MW;



图 4 IEEE 39 节点系统接线图 Fig.4 Wiring diagram of IEEE 39-bus system

各发电机的额定容量均为1000 MW。

表 3 为过载线路以及敏感线路对系统部分节点的灵敏度,根据本文优化算法得到的调整措施(其中负值表示加出力,正值表示减出力)和调整结果分别如图 5 和表 4 所示,其中图 5 还包括由文献[8]算法得到的调整方案,图 5 中 L₈表示节点 8 所连负荷,其他类似。由文献[8]算法所得的调整措施需要发电机调整 636.5 MW,所有的发电机都参与调整,并需在负荷节点 8 上切除 136.2 MW 的功率,才能达到控制要求。相反,本文只需 5 台发电机共调整 306 MW,和在负荷节点 8 上切除 28.2 MW 的负荷,就可以使得重负荷线路 22-21 的功率控制在 842.6 MW(低于极限功率 870 MW),过载线路 21-16 的功率控制在 566.5 MW(92.8%的负载率),同时还能确保系统中其余线路不出现过载现象,线路负荷均在 610 MW 以下。

为了验证所提多目标函数的有效性,本文增设 了将多目标函数与单目标函数(f₁和f₂)进行对比仿 真,结果如表5所示。由表5可知,如果只建立目 标函数f₁,虽然负荷在切除量上较多目标算法减少 3.4 MW,但却以增加2台调整设备为代价;另一方面, 以调整设备最少为唯一目标时,需要在节点8切除

表 3 过载线路以及敏感线路对部分节点的灵敏度

Table 3 Sensitivity of overload lines and sensitive lines to some nodes									
士上	重载线路双	线路对应灵敏度 敏感线路对应灵敏度							定合己始审
지막	22-21	21-16	5-6	15-16	16-19	6-7	6-11	10-11	- 尓 一 火 敬 皮
30	-0.0256	-0.0508	-0.0437	0.0045	-0.0149	0.0266	-0.0028	0.0065	-0.1449
32	-0.0231	-0.0459	0.2965	-0.2804	-0.0134	0.1363	0.4428	0.4505	0.0103
33	-0.0179	-0.0354	0.0030	0.2917	0.9297	0.0806	0.0970	0.0966	0.8922
34	-0.0201	-0.0398	0.0034	0.3279	0.9978	0.0906	0.1090	0.1086	1.0029
35	0.6211	0.6069	0.0032	0.3092	-0.0109	0.0854	0.1028	0.1024	2.3323
7	-0.0258	-0.0513	0.2029	-0.2543	-0.0150	-0.4829	0.2699	-0.2389	-0.5006
8	-0.0260	-0.0516	0.0424	-0.2501	-0.0151	-0.3113	0.2587	-0.2286	-0.5090



图 5 2 种调整方案对比

Fig.5 Comparison of regulating equipments and corresponding adjustment between two algorithms

表 4 调整效果					
	Table 4 A	djustment	effect	MW	
支路	调整前功率	调整结果	线路极限值	传输功率	
22-21	950.0	842.6	87	0	
21-16	675.8	566.5	61	0	
6-5	509.8	490.8	61	0	
16-15	486.6	488.6	61	0	
19-16	450.9	562.3	61	0	
6-7	441.9	427.3	61	0	
6-11	402.7	380.8	61	0	
10-11	401.4	367.1	61	0	

表 5 多目标与单目标调整方案对比表

Table 5 Comparison among multi-objective and single objective adjustment schemes

1	田藪恐友		目标/MW			
	 明	两正以田		f_2	$f_1 \cap f_2$	
		G ₃₀	-25.0	-25.0	-25.0	
		G ₃₂	19.3	77.8	54.8	
	- 生由 - 却	G33	-39.1	0	-63.2	
	及电机	G ₃₄	-50.8	-50.8	-50.8	
		G35	109.8	110.3	112.4	
		G ₃₆	10.2	0	0	
	6 莅	L_7	10.7	0	0	
	贝刊	L_8	14.1	112.0	28.2	

112 MW 的负荷,这严重违背了尽可能少切负荷的基本原则,由此可知,所提的多目标粒子群优化算法能够在尽可能不切负荷和参与调整设备最少上达到较好的协调,符合预防连锁调整控制措施的基本要求。

6 结论

本文提出一种基于多目标粒子群优化算法的预 防连锁跳闸控制策略,所得的调整方案能在保证消 除线路过载以及不出现新过载线路的前提下,做到 同时尽可能少切负荷和限制参与调整的设备。算法 具有以下特点。

(1)有效减少参与优化的约束条件。本文在得到 系统脆弱线路的基础上,将其与重新定义的重载线 路共同组成优化过程的敏感线路集,从而限制参与 计算的约束条件,减少计算量。

(2)通过优选控制节点减少参与计算的控制变

量。根据各节点的综合灵敏度,剔除综合控制效果 较小的节点,为实时控制争取时间。

(3)引入误差补偿系数,消除由灵敏度计算带来 的误差,从而避免调整出现欠控或过控,同时在一定 程度上提高线路的抗干扰能力。

参考文献:

[1] 葛睿,董昱,吕跃春. 欧洲"11.4"大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术,2007,31(3):1-6.

GE Rui,DONG Yu,LÜ Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lesson to be drawn to power grid operation in China [J]. Power System Technology,2007,31 (3):1-6.

[2] 石立宝,史中英,姚良忠,等. 现代电力系统连锁性大停电事故机 理研究综述[J]. 电网技术,2010,34(3):48-54.

SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3):48-54.

 [3] 丁理杰,江全元,包哲静,等. 基于多智能体技术的大电网连锁跳 闸预防控制[J]. 电力系统自动化,2008,32(17):6-11.
 DING Lijie,JIANG Quanyuan,BAO Zhejing,et al. A multiagent technology based control strategy to prevent cascading

trips in large power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17):6-11.
[4] 邓佑满,黎辉,张伯明,等. 电力系统有功安全校正策略的反向等

- [4] 邓阳湖, 梁库, 张阳岛, 寻. 电刀系统有功女主役正象畸形反同等 量配对调整法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18):5-8. DENG Youman, LI Hui, ZHANG Boming, et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18):5-8.
- [5] 程临燕,张保会,郝治国,等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):46-49. CHENG Linyan,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):46-49.
- [6] 程临燕,郝治国,张保会,等. 基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):51-55. CHENG Linyan,HAO Zhiguo,ZHANG Baohui,et al. Fsat elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):51-55.
- [7] 姜臻, 苗世洪, 刘沛, 等. 一种基于粒子群优化算法的转移潮流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18):16-20, 31.
 JIANG Zhen, MIAO Shihong, LIU Pei, et al. A particle swarm optimization based power flow transferring control strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18):16-20, 31.
- [8] 沈晓东,刘俊勇,刘彦. 基于节点不平衡功率的粒子群潮流转移 控制算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):1-5,70. SHEN Xiaodong,LIU Junyong,LIU Yan. A power flow transferring control algorithm based on node lopsided powers using particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(7):1-5,70.
- [9] 郑延海,张小白,钱玉妹,等. 电力系统实时安全约束调度的混合 算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(12):49-52.
 ZHENG Yanhai,ZHANG Xiaobai,QIAN Yumei, et al. Hybrid

63

algorithm for real-time security constrained dispatch of power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(12): 49-52.

[10] 李琳,罗剑波,周霞,等. 基于风险管理的过载切负荷策略制定[J]. 电网技术,2013,37(3):821-826.

LI Lin,LUO Jianbo,ZHOU Xia,et al. Risk management based drafting of overload load shedding strategy[J]. Power System Technology,2013,37(3):821-826.

- [11] 王海超,刘充许,宋祥春,等. 短期电能计划安全校正软约束模型[J]. 电网技术,2011,35(9):111-114.
 WANG Haichao,LIU Chongxu,SONG Xiangchun, et al. Security correction model with soft constraints for short-term energy scheduling[J]. Power System Technology,2011,35(9):111-114.
- [12] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):11-16.
 LI Yong,LIU Junyong,LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(19): 11-16.
- [13] 任建文,李莎,严敏敏,等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧 急控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):392-397.
 REN Jianwen,LI Sha,YAN Minmin,et al. Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm[J]. Power System Technology,2013,37(2):392-397.
- [14] FLORIN C, WILLIAM R, LOUIS W. Optimal power flow computations with constraints limiting the number of control actions [C] // 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference. Bucharest, Romania; [s.n.], 2009; 1-8.
- [15] 黄平. 粒子群算法及其在电力系统的应用[D]. 广州:华南理工 大学,2012.

HUANG Ping. Improved particle swarm algorithm and its

application in power system [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2012.

[16] 李鑫滨,朱庆军.一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化 中的应用[J].电工技术学报,2010,25(7):137-143.

LI Xinbin,ZHU Qingjun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(7):137-143.

- [17] 刘衍民,隋常玲,牛奔. 解决约束优化问题的改进粒子群算法
 [J]. 计算机工程与应用,2011,47(12):23-26.
 LIU Yanmin,SUI Changling,NIU Ben. Improved particle swarm optimizer for constrained optimization problems [J]. Computer Engineering and Applications,2011,47(12):23-26.
- [18] 龚国斌. 自适应约束优化混合粒子群算法[J]. 计算机工程与应用,2013,49(9):50-53.

GONG Guobin. Adaptive constrained optimization hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(9): 50-53.

作者简介:



任建文(1961—),男,山西吕梁人,教授,博士,主要研究方向为人工智能、电网调度自动化等(E-mail:rjw219@126.com);

魏俊姣(1990—),女,福建莆田人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统分析、运 行与控制(E-mail;wjj903239@163.com);

谷雨峰(1989—),男,黑龙江齐齐哈尔 人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统

分析、运行与控制(E-mail:414466189@gq.com)。

Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips

REN Jianwen¹, WEI Junjiao², GU Yufeng¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Putian Electric Power Supply Company, Putian 351100, China)

Abstract: Aiming at the heavy computational load and multiple regulating equipments of traditional optimization algorithm, a control strategy based on the multi-objective particle swarm optimization algorithm to prevent the cascading trips is proposed, which realizes as less regulating equipments and less load shedding as possible. It identifies the vulnerable lines sensitive to the increased nodal injecting power, combines the identified vulnerable lines with the redefined overload lines to form a sensitive line set to be taken as the constraints of the control algorithm, calculates the integrative sensitivity for each node according to its load rate and sensitivity, neglects the control variables with little effect for realizing the optimal selection of regulating equipments and reducing the computational load. Case studies for IEEE 9-bus and IEEE 39-bus standard systems show that the proposed method is effective and feasible.

Key words: load control; sensitive line set; integrative sensitivity; sensitivity analysis; multi-objective; particle swarm optimization algorithm; cascading trips; preventive control