

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191542

基于多用户非合作博弈模型的切负荷策略优化方法

张金锋¹, 崔晓丹^{1,2}, 许剑冰^{1,2}, 雷鸣¹, 刘旋¹, 薛峰^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 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 211006)

摘要: 为了兼顾电网安全稳定和故障下切负荷对社会造成的影响, 针对切负荷控制策略如何减少控制代价、并反映各负荷用户间公平竞争等问题, 提出了保障大功率缺额场景下系统频率稳定性的切负荷控制优化决策方法。首先从负荷优先级、负荷损失代价、切负荷量精确度三个方面分析了影响切负荷控制效果的要素。在此基础上, 利用博弈论原理, 构建了各负荷用户作为参与者的多负荷用户非合作博弈模型。然后设计了基于 NSGA-II 算法的求解方法, 通过求解多目标优化模型, 获得 Pareto 整体最优解作为切负荷优化策略。最后通过区域电网典型算例, 验证了所提出模型及其求解方法的有效性。

关键词: 频率稳定; 切负荷策略; 非合作博弈模型; NSGA-II; Pareto 最优

An optimization method of load-shedding strategy based on a multi-user non-cooperative game model

ZHANG Jinfeng¹, CUI Xiaodan^{1,2}, XU Jianbing^{1,2}, LEI Ming¹, LIU Xuan¹, XUE Feng^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211006, China)

Abstract: There is a need to balance the safety and stability of the power grid and the impact of load shedding in a fault condition. To achieve reduction of the control cost and reflect fair competition among load users, this paper proposes a load-shedding control optimization decision-making method to guarantee system frequency stability under high-power shortage scenarios. First, the factors affecting the effect of load shedding control are analyzed from three aspects: load priority, load loss cost and load shedding accuracy. On this basis, a non-cooperative game model of multi-load users with various load users as participants is constructed using the principle of game theory. Then the NSGA-II algorithm is used to solve the problem. By solving the multi-objective optimization model, the Pareto global optimal solution is obtained as the load-shedding optimization strategy. Finally, the effectiveness of the proposed model and its solution method is verified by a typical example of a regional power grid.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5100-201940008A-0-0-00) "Research on System Protection Test Verification Technology based on Multi-mode Joint Real-time Simulation and Control Strategy Flexible Reconstruction".

Key words: frequency stability; load shedding strategy; non-cooperative game model; NSGA-II; Pareto optimal

0 引言

我国电力系统已形成高压直流大容量、远距离输电格局, 新能源电力占比高, 受端电网中传统电源被直流和新能源大量替代, 电网应对大功率失去

故障的频率调节能力越来越弱。一旦发生特高压直流闭锁或多回直流同时闭锁等故障, 极有可能引发电网频率大幅波动, 严重情况下可诱发连锁故障, 导致大范围停电^[1-2]。为了防止严重故障下频率失稳, 切除部分负荷在所难免。切负荷控制的目标是制定出满足控制量需求、用户损失小的负荷切除策略。大量可中断负荷的出现, 为切负荷措施提供了更加经济、灵活的选择空间。然而, 精细化切除大量点多、面广可中断负荷措施与传统切负荷(一般切

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-201940008A-0-0-00)“基于多模式联合实时仿真和控制策略灵活重构的系统保护测试验证技术研究”

除某一变电站或其馈线负荷,一个切除单元的负荷切除量往往较大)一起参与故障下紧急控制,使得切负荷紧急控制成为不同粒度、多等级、离散变量优化问题,控制策略的制定变得更为复杂。文献[3-6]提出了计及优先级的分轮次切负荷方法,尽管能保障特殊用电负荷的安全性,但现有按优先级切除方法中每轮切负荷的次序和切除量是预先设定的,发生不同功率缺额时无法自适应调整,从而常常会造成过切或欠切。文献[7-9]从获取最精确切负荷效果出发,将切负荷抽象为单目标或多目标优化问题,并采用贪婪算法、遗传算法等方法求解,以获取几乎与切负荷目标功率相一致的切除方案,但忽略了军用、医院等特殊用电负荷的重要性。还有部分研究针对各负荷用户都为减少自身损失相互竞争的现实问题,将各用电负荷抽象成具有决策能力的主体,并采用博弈原理剖析负荷用户在切负荷过程中的策略与均衡解,这种分析方法能够获得各方达成一致的较优解,但在大多数情况下都无法获得考虑多目标的最优解集^[10-12]。

针对上述种种不足,本文综合考虑负荷重要程度、负荷损失代价、负荷用户间存在的市场竞争行为等因素,在分析影响切负荷控制效果的要素基础上,构建了表征各负荷用户追求负荷损失代价最小化行为的非合作博弈模型,并设计采用 NSGA-II 算法求解博弈模型的整体最优解,在保障重要负荷正常运行的条件下,实现各负荷用户间利益均衡、切负荷量准确的目标。

1 影响切负荷控制效果的要素分析

本文首先从负荷切除优先级、负荷损失代价和切负荷量精确度 3 个角度,分别给出了量化评估影响精准负荷控制策略效果的方法,为后续构建综合计及多因素影响的策略优化模型提供基础。需要指出的是,本文侧重研究的是切负荷控制策略对故障后频率稳定效果的综合评估,对于支撑电压稳定方面的分析指标^[13]本文暂不考虑。

(1) 负荷切除优先级

负荷切除的优先级与负荷的重要程度密切相关,重要程度低的切除优先级高。如银行、医院、重要工厂、大型场馆等负荷重要程度较高。而抽水蓄能、城市景观灯等负荷重要程度较低^[14-15]。为了定量描述负荷的重要程度,本文借鉴专家经验法,通过分档分级给出负荷优先级的量化描述。即先将负荷分档,然后在每一档下再将其细分为多个级别。属于负荷用户的负荷优先级可表示为

$$L_i(x) = (d_i, l_i) \quad (1)$$

式中: d_i 为档位, l_i 为级别,均为整型数; $d_i \in [1, s]$, $l_i \in [1, t]$, s 、 t 分别为该负荷档位和级别的总数。档位越低、优先级越低,表示重要程度低,应优先切除;档位相同,级别低的负荷原则上优先切除。但需要强调的是,为了提高切负荷的选择空间,可以根据需要灵活切除同一档的不同级别的负荷(即此时同一档的负荷级别被视为相同)。

(2) 负荷损失代价

对用户负荷损失的考量较为复杂,往往需要考虑国民经济生产、社会稳定、公开公平等多种因素^[16-18]。本文将停电损失的经济费用作为负荷损失代价。切负荷控制系统^[19]除了故障判别及命令下达控制主站外,还包含多个控制子站和大量负荷终端。控制子站可抽象为其可控范围内所有负荷的负荷用户,而各负荷终端为隶属于负荷用户的部分用电量。采取此种设定方式能够通过控制负荷用户数量降低 2.2 节优化模型的复杂度。每个负荷用户单位工作时间内用电量可以表示为

$$W_i = \sum_{j=1}^k w_i^j \quad (2)$$

式中: w_i^j 为负荷终端 j 单位时间内消耗的电量; k 为隶属于负荷用户 i 的负荷终端数量; W_i 为负荷用户 i 所有负荷终端单位时间所消耗的电量。

定义 V_i 为负荷用户 i 所有负荷损失的代价,可表示为

$$V_i = \sum_{j=1}^n (V_i^j \times w_i^j) \quad (3)$$

式中, V_i^j 为负荷用户 i 所属第 j 个负荷终端的单位电量切除代价,负荷档位越高,其单位电量切除代价越大。所有负荷用户切除负荷的损失代价可以表示为

$$L = \sum_{i=1}^m V_i \quad (4)$$

式中, m 为负荷用户总数。

(3) 切负荷量精确度

为了应对大功率缺额故障下可能造成的频率失稳,一般采取“切平”的控制策略(即切负荷量与功率缺额相等),而由于各可切单元为离散的、数额大小不一的负荷子站或负荷终端,实际切除过程中往往存在欠切或过切的问题。尽管适量的欠切或过切可能不会造成控制效果的损失甚至效果可能更好,但对于频率问题,“切平”显然是一种可靠且可考核的手段,因此本文在控制策略设计时,以最终切负

荷量与“切平”的差距作为控制效果的一个评判标准。切负荷量精确度表征为

$$\Delta P^* = 1 - \frac{|P_o - P_r|}{P_o} \quad (5)$$

式中: P_r 为各负荷用户实际切除总量; P_o 为功率缺额。

由于实际系统具有一定的调频能力, 能够承受一定程度的欠切或过切, 因此 ΔP^* 只要大于某一阈值 σ^* (可根据实际系统推算或经验确定), 就能使频率恢复稳定。本文将切负荷量精确度作为切负荷控制优化的约束条件, 其有效取值范围为 $[\sigma^*, 1]$ 。 ΔP^* 在区间内的不同取值能够反映切负荷策略对提高电网频率稳定裕度或降低切负荷损失代价的侧重程度。例如, 当重点考虑经济性时, 切负荷策略需偏向降低切负荷损失代价, ΔP^* 取值应越接近 σ^* 。

2 多负荷用户博弈优化决策模型

2.1 多负荷用户非合作博弈模型

为了维护自身经济利益、避免切除过多负荷, 各负荷用户在切负荷控制过程中存在相互博弈、公平竞争的关系, 主要表现为大功率缺额后, 各负荷用户在每一轮切负荷过程中都希望将影响小、代价低的负荷作为优先切除的策略, 这种行为关系是一种典型的非合作博弈^[20]。为了在制定切负荷控制策略过程中反映出这种潜在的行为关系, 本文采用博弈论模型进行表征, 博弈模型主要包含以下要素。

(1) 博弈方

在博弈中, 每个有决策权的参与者称为一个博弈方。各负荷用户在切负荷过程中都是博弈的参与者(即博弈方), 在每一轮切负荷博弈中选择合适的切除策略来追求自身的切负荷损失最小。这里, 可以将每一轮切负荷作为各负荷用户间的一次博弈, 通常切负荷的轮次是有限的, 因此各负荷用户按轮次切负荷是一种有限博弈。

(2) 策略

每个博弈方都可以选择实际可行的行动方案, 每个可行方案称为这个博弈方的一个策略。本文将每个负荷用户选择切除其所属的负荷作为博弈的策略, 记为 s_j^i , 表示负荷用户 i 的第 j 个策略, 负荷用户 i 所有可用的策略集合表示为 $S^i = (s_1^i, s_2^i, \dots, s_{m_i}^i)$, 其中 m_i 为负荷用户 i 的策略总数。在每一轮切负荷过程中, 负荷用户 i 可以从策略集 S^i 中选择任意一个策略进行博弈。

(3) 支付

在博弈过程结束后, 各博弈方的得失称为支付。

各博弈方的支付不仅与该博弈方自身所选择的策略有关, 还与所有其他博弈方做出的策略组合有关, 因此各博弈方的支付是全体博弈方所选取的策略集合的函数, 通常将支付函数记为 $u_i(X)$ 。本文将每个负荷用户切除负荷造成的损失代价作为支付函数, 负荷用户 i 的支付函数为 $u_i(X) = V_i$, 其中 V_i 为负荷用户 i 的切负荷损失代价, X 为所有负荷用户已选用的策略集, 表示为 $X = \{X^1, \dots, X^i, \dots, X^n\}$, $X^i \subset S^i$, X^i 则是负荷用户 i 在所有切负荷轮次中选用的策略集。

(4) 均衡

每一个负荷用户在博弈中均选用自己满意的切负荷策略, 当其他负荷用户不改变策略, 其中任意一个负荷用户都无法通过调整自身策略来减少其负荷损失时, 博弈便达到一个稳定状态, 即纳什均衡。在这种稳定状态下, 各负荷用户的策略集就是博弈的均衡解, 记作 X^* 。策略集合 X^* 成为多负荷用户非合作博弈纳什均衡解的充分必要条件是: 对任意一个负荷用户 i 的每个策略 $s_j^i (j=1, 2, \dots, m_i)$, 都有 $u_i(X^* \| s_j^i) \geq u_i(X^*)$, 即单一改变任意负荷用户的策略 s_j^i 都无法降低其负荷损失的代价。

2.2 基于多负荷用户博弈的切负荷控制优化模型

在 n 个负荷用户的博弈模型中, 每个负荷用户都为实现自身的切负荷损失代价最小而相互博弈, 并最终达到均衡状态。在此状态下, 各方的利益都达到相对最大, 任何一方试图擅自改变切负荷策略来打破这种均衡, 都无法降低自身切负荷的损失代价。每个负荷用户追求自身切负荷损失代价最小化的表示如式(6)所示。

$$\begin{cases} \min u_i(X) \\ u_i(X) = V_i, i \in (1, 2, \dots, n) \\ L(x_c^i) \leq L(x_r^i), x_c^i \in X^i, x_r^i \in (S^i - X^i) \end{cases} \quad (6)$$

该模型将各负荷用户的最小化负荷损失代价作为优化目标, 将负荷切除优先级和切负荷量精确度作为约束条件。其中, $X = (X^1, X^2, \dots, X^i, \dots, X^n)$ 为 n 个负荷用户选择的策略集群, X^i 为负荷用户 i 已选切负荷的策略集; V_i 表示负荷用户 i 切除负荷的代价, $L(x_c^i)$ 表示负荷用户选择切除负荷的优先级, x_c^i 表示负荷用户 i 已选切负荷策略集 X^i 中的单一策略。

需要重点指出的是, 非合作博弈模型客观反映了负荷用户间的公平竞争关系, 形成的纳什均衡是从单一负荷用户视角出发, 追求个体损失代价最小

而动态达成的一种稳定状态, 这种状态通常不是所有负荷用户均付出最小损失代价的最优均衡解。电网运行单位既希望维护负荷用户间的公平竞争关系, 也希望能够从全局视角获取各个负荷用户都满意的整体最优的均衡解。为了制定出符合电网运行单位立场的切负荷控制策略, 本文将 n 个负荷用户的非合作博弈模型转换成切负荷多目标优化模型, 其表示形式如式(7)所示。针对该多目标优化模型, 求解出 Pareto 最优解集, 并从中选择整体最优的均衡解, 作为 n 个负荷用户博弈的最优均衡状态。

$$\begin{cases} \min u_1(X), \dots, \min u_i(X), \dots, \min u_n(X) \\ \begin{cases} u_i(X) = V_i \\ \Delta P^* = 1 - \frac{|P_0 - P_r|}{P_0} \\ L(x_c^i) > L(x_r^i), x_c^i \in X^i, x_r^i \in (S^i - X^i) \\ \Delta P^* \geq \sigma, \sigma \in [\sigma^*, 1] \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

另外, 电网运行单位可以在 $[\sigma^*, 1]$ 间选取不同的 σ , 以求取不同切负荷量精确度约束条件下的最优切负荷策略。在满足优化目标的同时, 求解出的切负荷优化方案的 ΔP^* 越逼近设定的 σ , 则越符合负荷用户相互竞争的行为关系, 可视为优化算法更优越。

3 基于 NSGA-II 的求解算法

在切负荷控制多目标优化模型求解过程中, 如果负荷用户数量为 n 、每个用户可选择切除的负荷类型为 α 、切除轮数为 β 时, 能够组合出 $\alpha^{n\beta}$ 种不同的优化方案(例如 10 个负荷用户、各有 6 种可选择切除的负荷类型、进行 8 轮次切除时, 优化空间有 6^{80} 种方案), 面对如此庞大的优化方案空间, 简单的全局遍历搜索方法显然不合适。本文采用 NSGA-II 算法求解切负荷控制多目标优化模型的 Pareto 前沿, 并以此为基础, 选择出整体最优的均衡解。该算法是一种带精英策略的非支配排序的遗传算法, 能够解决一般启发式算法复杂度高、容易丢失最优解的不足。基于该算法的求解方法主要包括以下重要环节。

(1) 染色体的编码方式

假设负荷用户 i 可选的策略集合为 $S^i = \{s_1^i, s_2^i, \dots, s_{m_i}^i\}$, 其第 k 轮选择的策略为 $s_k^i, s_k^i \in S^i$ 且 $k \leq m_i$, 所有用户每一轮选择的策略构成了本轮切负荷的方案, 表示为 $S_k = \{S_k^1, S_k^2, \dots, S_k^i, \dots, S_k^n\}$ 。本文采用整数型编码方式对切负荷方案进行编码, 编码形成的个体是由 n 个整数组成的有

序序列 $S_i = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, 其中 s_i 为用户 i 所选策略在其策略集合中的序号, 即 $s_i \in \{1, 2, \dots, m_i\}$ 。例如, 当 s_i 取 1 时表示负荷用户 i 选择其策略集合中第 1 个策略 S_i^1 作为本轮切负荷的策略。

(2) 非支配排序

评判个体性能优劣的标准是适应度函数, 本算法的适应度函数主要从各负荷用户的负荷损失代价多个角度进行度量, 并从多个维度对切负荷控制策略优化方案种群分层排序, 通过这种快速非支配排序方式搜索潜在的 Pareto 最优解。

(3) 拥挤度计算

拥挤距离计算主要依据每个目标函数对种群中的所有个体按升序进行排序。这里定义第 i 个个体的拥挤距离为第 $i+1$ 和第 i 个个体的所有目标函数值之差的绝对值和(即各负荷用户切负荷损失代价差的绝对值和), 并假设第一个和最后一个个体的拥挤距离设为无穷大。通过拥挤度计算, 优先选择拥挤度距离较大的个体, 使得计算结果在搜索空间内均匀分布, 保持群体的多样性, 避免陷入局部较优。

(4) 遗传算子

遗传算子主要包括交叉算子、变异算子和选择算子, 对于交叉算子和变异算子的设计可参考文献[21], 这里不再赘述。在设计选择算子时, 首先将初始种群、经交叉操作得到的种群和经变异操作得到的种群合并为一个种群, 称为合并种群; 然后采用适应度值计算方法来计算合并种群中每个个体的适应度值, 并综合采用快速非支配排序方式、拥挤度计算和精英策略选择产生较优的种群。

(5) 终止条件

在每一轮切负荷过程中, 最大迭代次数设为 200, 若达到迭代次数, 则结束本轮切负荷迭代过程。设定整个算法的终止条件为切负荷量精确度 ΔP^* 达到约束条件 σ 。整个算法停止迭代后, 选取切负荷过程中适应度值较高的非支配个体作为最优解, 然后对其进行解码, 形成最终的最优切负荷策略。

(6) 算法步骤

步骤 1: 设置合适的种群规模 N_d , 采用整数型的编码方式对个体进行编码, 随机产生初始种群 N_i 。

步骤 2: 通过选择、交叉、变异和非支配排序后产生第一代子群 N_j 。

步骤 3: 将两群合并形成新种群 N_k , 并通过非支配排序、拥挤度计算和选择操作后产生新一代种群 N_e 。

步骤 4: 对 N_e 进行交叉、变异、选择操作, 产

生变异种群 N_p 。

步骤 5: 重复步骤 3 至步骤 4, 直至达到每轮切负荷终止条件, 即满足迭代次数 200。

步骤 6: 如果本轮切除负荷后, 切负荷优化方案总切除量达到切负荷量精确度要求, 则保存该方案; 如果未满足切负荷量精确度要求且本轮次没有达到最大切负荷轮次, 则转至步骤 2, 进行新一轮切负荷的迭代求解。

步骤 7: 如果未满足切负荷量精确度要求且当前切负荷轮数 L 已达到最大切负荷轮次 Lun , 则认为该参数设置条件下无解, 结束算法搜索。

算法整体流程如图 1 所示。

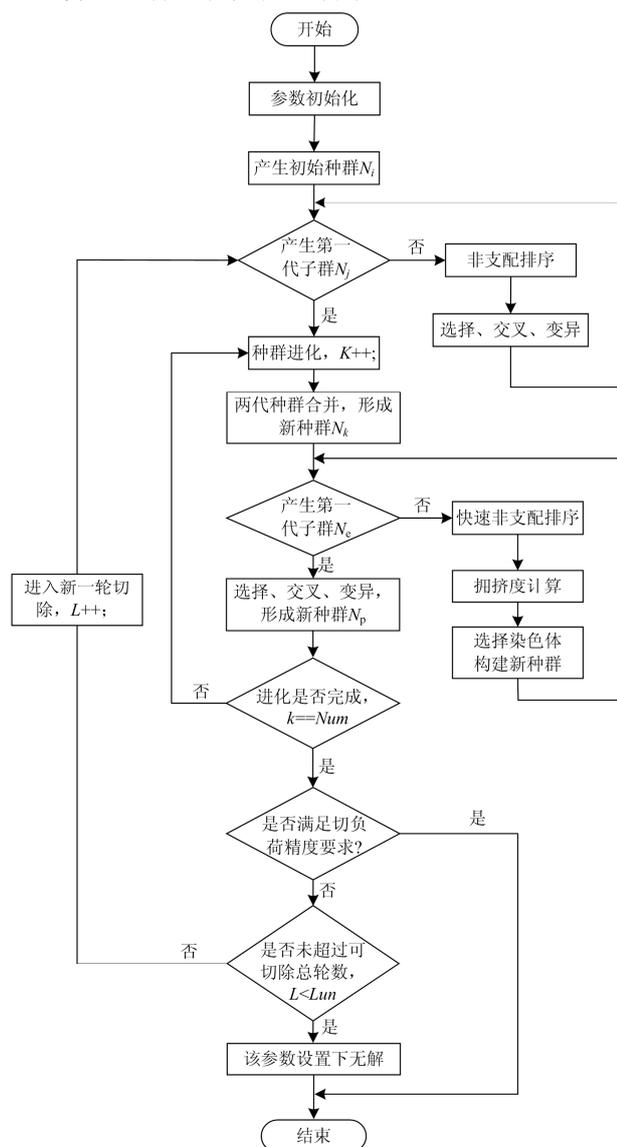


图 1 基于 NSGA-II 算法的切负荷控制优化求解流程

Fig. 1 Accurate load shedding optimization solution process based on NSGA-II algorithm

4 案例分析

以某区域大电网馈入直流双极闭锁故障为例, 在发生直流双极闭锁后, 区域电网瞬时损失功率为 750 万 kW, 在提升既有可提升直流功率基础上, 仍需切除负荷 310 万 kW。区域电网内负荷共抽象为 7 个负荷用户, 每个负荷用户下的负荷优先级、可中断负荷数量及其功率如表 1 所示。每一轮切负荷过程中, 每个负荷用户都可以从不同功率负荷中选择要切除的负荷作为本轮博弈的策略。这里设定切负荷量精确度约束的最小阈值 σ^* 为 0.95、最大切负荷轮次 Lun 为 10; 同时, 设定优先级为 1 档的负荷用户所有负荷终端被切除时的单位电量切除代价 v_i^j 为 2, 2 档和 3 档负荷用户的单位电量切除代价分别为 4 和 6。

表 1 各负荷用户的策略信息和优先级

Table 1 Policy information and priority of each load user

负荷用户名称	可切负荷数量	单负荷功率/ 万 kW	优先级(档, 级)
负荷用户 A	10	6	(1,1)
	10	8	
	10	10	
负荷用户 B	10	6.5	(1,2)
	10	8	
	10	11	
负荷用户 C	10	5.5	(1,3)
	10	7	
	10	10	
负荷用户 D	10	6	(1,4)
	10	7	
	10	9	
负荷用户 E	10	3	(2,1)
	10	5	
	10	5	
负荷用户 F	10	3	(2,2)
	10	4	
负荷用户 G	10	2	(3,1)
	10	3	

(1) 切负荷量精确度为 0.99 条件下的切负荷控制优化分析

假设电网运行单位在区间 $[0.95, 1]$ 中选取 0.99 作为需要达到或逼近的切负荷量精确度要求。在此约束条件下, 利用本文设计的分析方法求解出帕累托前沿, 并从中抽取出部分帕累托最优解, 求解出的典型帕累托最优解情况如表 2 所示。

与利用传统贪心策略(将切负荷方案快速达到切负荷量精确度要求作为求解策略)求解的切负荷结果进行对比, 各负荷用户的负荷损失代价分布情况如图 2 所示。本方法各负荷用户间的负荷损失代

价根方差为 5.18, 采用传统贪心策略获得的根方差为 13.87, 本方法优化方案的负荷损失代价更为均衡; 同时, 本方法优化方案的切负荷量精确度为

0.990 3, 采用传统贪心策略的切负荷量精确度为 0.996 8, 本方法整体均衡解的切负荷效果更接近切负荷量精确度要求。

表 2 切负荷量精确度为 0.99 时, 算法求解出的典型帕累托最优解信息

Table 2 Typical Pareto optimal solution information solved by the algorithm when the load-carrying satisfaction is 0.99

优化方案序号	切负荷策略信息	每个用户切除的总轮数、总负荷功率(万 kW)和负荷损失							切负荷量精确度
		用户 A	用户 B	用户 C	用户 D	用户 E	用户 F	用户 G	
1	切除轮数	6	7	7	7	6	6	6	0.990 3
	切除负荷	36	45.5	38.5	43	30	24	18	
	损失代价	72	91	77	86	120	96	108	
2	切除轮数	7	6	7	7	6	6	6	0.990 3
	切除负荷	68	39	67	54	30	24	18	
	损失代价	136	78	134	108	120	96	108	
3	切除轮数	7	7	6	7	6	6	6	0.990 3
	切除负荷	68	74	33	60	30	24	18	
	损失代价	136	148	66	120	120	96	108	
4	切除轮数	6	7	7	6	6	6	6	0.990 3
	切除负荷	60	45.5	38.5	36	30	24	18	
	损失代价	120	91	77	72	120	96	108	
5	切除轮数	6	6	7	6	6	6	6	0.990 3
	切除负荷	60	66	67	54	18	24	18	
	损失代价	120	132	134	108	72	96	108	
6	切除轮数	6	6	7	6	6	6	6	0.995 2
	切除负荷	60	66	65.5	54	30	18	18	
	损失代价	120	132	131	108	120	72	108	
7	切除轮数	6	6	7	6	6	6	6	0.995 2
	切除负荷	60	66	65.5	54	30	24	12	
	损失代价	120	132	131	108	120	96	72	
8	切除轮数	10	9	10	10	9	9	9	0.990 3
	切除负荷	60	58.5	56.5	60	27	27	18	
	损失代价	120	117	113	120	108	108	108	

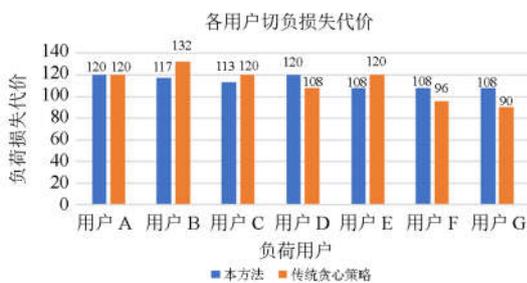


图 2 切负荷量精确度为 0.99 时, 本方法与传统贪心策略切负荷优化方案效果对比

Fig. 2 Comparison of the effect of this method with the traditional greedy strategy load shedding optimization scheme when the load shedding satisfaction is 0.99

(2) 不同切负荷量精确度下的两种切负荷方法效果对比

在设定切负荷量精确度为 0.95、0.96、0.97、0.98 和 0.99 的不同条件下, 分别采用本方法与传统贪心策略进行切负荷控制优化求解。并从各负荷用户损失代价均衡性、切负荷量精确度要求拟合度两方面, 对比两种方法切负荷优化方案的效果, 对比效果如图 3 所示。图 3 表明: 在 5 种不同切负荷量精确度条件下, 本方法获取的整体均衡解的各负荷用户损失代价根方差更低、均衡性更好, 比传统贪心策略优化方案更能反映各负荷用户间相互公平竞争的行为关系; 同时, 本方法整体均衡解的切负荷量精确

度更加逼近预设的切负荷量精确度要求。

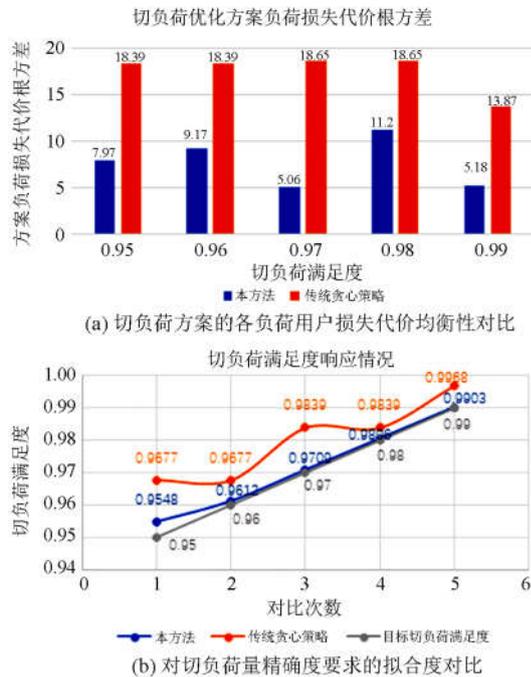


图3 不同切负荷量精确度下, 本方法与传统贪心策略切负荷优化方案效果对比

Fig. 3 Comparison of the effects of this method and traditional greedy strategy load shedding optimization scheme under different load shedding satisfaction degrees

5 结论

本文针对现有切负荷控制策略的不足, 考虑到不同负荷的重要度以及用户为保障自身利益而相互竞争的实际情况, 量化设计了分档分级的负荷优先控制等级, 构建了计及负荷用户间经济平衡、以最小控制代价为目标的博弈模型, 并设计了基于NSGA-II算法的求解方法。

本文方法通过模拟切负荷控制过程中负荷用户间相互竞争的实际行为特征, 通过保障切负荷控制准确性和优先级顺序, 实现了大功率缺额下保障系统频率稳定性的切负荷策略的自动优化计算。后续的研究包括: 根据考虑频率动态特性与功率缺额间的关系, 精确设定精度阈值; 将切负荷算法推广至考虑电压稳定的控制场景, 等等。

参考文献

[1] 陈国平, 李明节, 许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10. CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHVAC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,

42(22): 2-10.

[2] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771. TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.

[3] 赵强, 王丽敏, 刘肇旭, 等. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 35-40. ZHAO Qiang, WANG Limin, LIU Zhaoxu, et al. Frequency characteristics of national grid interconnection system and low frequency load shedding scheme[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 35-40.

[4] 秦明亮, 杨秀朝. 减少低频减载方案过切的措施研究[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 83-86. QIN Minliang, YANG Xiuzhao. Research on measures to reduce over-cutting of low-frequency load shedding scheme[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 83-86.

[5] 张钦, 王锡凡, 别朝红, 等. 电力市场下直接负荷控制决策模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 23-28. ZHANG Qin, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. A decision model of direct load control in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 23-28.

[6] 李兆伟, 刘福锁, 崔晓丹, 等. 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 35-40. LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.

[7] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192. WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network fault recovery based on hierarchical preference and order method and load shedding[J]. Journal of Electrotechnics, 2015, 30(20): 185-192.

[8] HSU C T, KANG M S, CHEN C S. Design of adaptive load shedding by artificial neural networks[J]. IEEE Conference Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 2005, 152(3): 415-421.

[9] KULKARNI A V, GAO W, NING J. Study of power system load shedding scheme based on dynamic simulation[C] // IEEE PES Transmission and Distribution Conference, April 19-22, 2010, New Orleans, LA, USA: 1-7.

[10] MANBACHI M. A new solution for maintenance scheduling using maintenance market simulation based on game theory[C] // 2009 IEEE Electrical Power &

- Energy Conference (EPEC), October 22-23, 2009, Montreal, QC, Canada: 1-8.
- [11] 刘旭东. 博弈论在电力市场竞价中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
LIU Xudong. Application research of game theory in power market bidding[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [12] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [13] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 24-28.
HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of automatic load reduction control based on dynamic interaction of voltage and frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 24-28.
- [14] 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. An overload load shedding strategy based on risk management[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 821-826.
- [15] 孙腾飞, 程浩忠, 张立波, 等. 基于改进混合抽样与最小切负荷计算的电力系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 96-103.
SUN Tengfei, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Reliability evaluation based on modified mixed sampling and minimum load-cutting method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 96-103.
- [16] 张执超. 电力系统紧急状态下切负荷控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHANG Zhichao. Study on load shedding strategy for power system under emergency situations[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [17] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663.
WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [18] 张红丽, 刘福锁, 李威, 等. 高渗透率光伏接入电网暂态电压失配风险及切负荷方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 158-164.
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Transient voltage mismatch risk and load shedding control method with high permeability photovoltaic power grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 158-164.
- [19] 殷伟, 颜云松, 潘琪, 等. 精准负荷控制系统的快速通信接口方案设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 143-149.
YIN Wei, YAN Yunsong, PAN Qi, et al. Design of fast communication interface for precision load control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 143-149.
- [20] 刘晓峰, 高丙团, 罗京, 等. 基于非合作博弈的居民负荷分层调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 54-60.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LUO Jing, et al. Non-cooperative game based hierarchical dispatch model of residential loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 54-60.
- [21] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [22] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
BI Pengxiang, LIU Jian, LIU Chunxin. A refined genetic algorithm for distribution network reconstruction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.
- [23] 游金阔, 黄霆, 黄道姗, 等. 基于改进遗传算法的交直流系统低压减载优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 40-47.
YOU Jinkuo, HUANG Ting, HUANG Daoshan, et al. Under-voltage load shedding optimization allocation for AC/DC hybrid system based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 40-47.

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-02-20

作者简介:

张金锋(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统经济运行及优化协调控制技术; E-mail: zhangjinfeng@sgepri.sgcc.com.cn

崔晓丹(1981—), 男, 通信作者, 博士, 研究员级高工, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析及控制技术; E-mail: cuixiaodan@sgepri.sgcc.com.cn

许剑冰(1971—), 男, 博士, 研究员级高工, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析及控制技术。E-mail: xujianbing@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)