

DOI: 10.7667/PSPC171232

考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化

李鹏飞, 顾雪平, 杨超, 李少岩, 师楠, 臧二彬

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 综合考虑所切负荷的重要程度、频率调节特性与布点位置对低频减载方案整体效果的影响, 结合系统待优化轮次减负荷量的要求和装置的动作特点, 提出了一种考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化方法。以停电损失最小化、所切负荷的单位调节功率最小化和潮流转移熵最大化为优化目标, 综合考虑各种约束条件, 采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解出 Pareto 最优解集。然后通过灰色关联分析模型对其进行多属性决策, 以确定出最科学合理的低频减载方案。最后, 采用新英格兰 10 机 39 节点系统算例验证了所提优化方法的合理性与有效性。

关键词: 电力系统; 低频减载; 潮流转移; 优化; 灰色关联分析

Optimization of low-frequency load shedding scheme considering the influence of power flow transferring on the power system

LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, LI Shaoyan, SHI Nan, ZANG Erbin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Considering the importance, the frequency adjustment characteristic and the position of the load cut off on the overall effect of the low-frequency load shedding scheme, combined with the load shedding requirements of the cycle to be optimized and the action characteristics of devices in the system, an optimization method of low-frequency load shedding scheme considering the influence of power flow transferring on the power system is proposed. The optimization goals are designed to minimize power loss, minimize the unit power regulation of load cut off and maximize the flow transfer entropy, considering all kinds of the constraints, the Pareto optimal solution set is solved by using the fast and elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II). Then multiple attribute decision-making should be made for it through the gray relational analysis model to determine the most scientific and reasonable low-frequency load shedding scheme. Finally, the rationality and validity of the proposed method are demonstrated by an example of the New England 10-machine 39-node system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277076).

Key words: power system; under-frequency load shedding scheme; power flow transferring; optimization; grey relational analysis

0 引言

作为衡量电网运行质量的一个重要指标, 频率反映的是系统内电源供电与负荷消耗的有功平衡关系。当系统内出现大的有功缺额时, 其频率会出现较大跌落, 持续时间过长容易引发连锁故障甚至造成系统崩溃。作为电网安全运行第三道防线中不可或缺的重要组成部分^[1], 低频减载是电力系统出现严重频率跌落时保证其尽快恢复到稳定运行状态而所需

采取的必要的校正控制手段^[2]。

目前, 低频减载方法主要包括传统低频减载法^[3]、半适应低频减载法^[4-5]、自适应低频减载法^[6]和人工智能低频减载法^[7]种。为更好地满足当前及今后一个时期电网运行的需要, 本文主要对现阶段国内广泛采用的基于启动频率和附加延时的传统低频减载方法进行优化。

近些年来, 诸多专家学者围绕这一问题进行了大量卓有成效的研究与探索。文献[8-9]指出在低频减载过程中为使系统频率尽快恢复到正常运行状态, 应优先切除频率调节系数小的负荷出线以充分

利用剩余负荷自身的频率调节能力,但由于缺乏对负荷重要程度的合理区分界定,导致所得减载方案难以满足电网的实际运行要求。文献[10]综合考虑负荷的重要性与频率特性对低频减载方案整体效果的影响,对各轮所切除负荷的类型及比例进行了优化调整。文献[11-13]在已有研究的基础上,将新的指标纳入到表征减载方案优劣的评价体系中,并基于此设计了新的低频减载优化策略,为减载装置的选址定容提供了更加有效的指导与合理的参考。

上述研究认为系统内所有负荷均可参与减载操作,而以停电损失的大小表征负荷重要程度不同给减载方案带来的差异。实际上,在电网运行过程中,电力调度机构、党政机关、通信机构、医院等 I 类负荷的供电中断会危及社会的安全稳定与人民的人身安全,给社会造成不可估量的影响,以往用一个较大的停电损失数值来表征其与 II、III 类负荷间差异的做法仍有待商榷^[14]。此外,当电网遭遇的事故情况较为严重时,多轮次低频减载装置的动作必然会引发各支路潮流的大规模转移,给系统造成巨大冲击并可能引发振荡,导致其运行状态进一步恶化,因此有必要在制定减载方案时充分考虑潮流转移对系统的影响,以提高减载操作过程中电网的安全稳定运行水平。

为克服现有研究中存在的不足,本文将潮流转移熵引入到待优化的目标函数中,综合考虑所切负荷的重要程度、频率调节特性与布点位置对低频减载方案的影响,结合系统待优化轮次减负荷量的要求和装置的动作特点,建立了考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化模型。以停电损失最小化、所切负荷的单位调节功率最小化和潮流转移熵最大化为优化目标,综合考虑各种约束条件,采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解出 Pareto 最优解集;然后通过灰色关联分析模型对其进行多属性决策,以确定出最科学合理的低频减载方案。

1 低频减载方案优化模型

1.1 目标函数的建立

考虑到实际的减载操作以出线为单位进行^[15],为确保低频减载装置的动作不影响 I 类负荷的持续供电,本文设定含有 I 类负荷的出线均不参与此过程。由于各出线上负荷大小各异且呈离散分布,不同方案的负荷切除总量难以做到完全相等,因此认为将总切除量控制在一个合理范围内,能够使得频率满足系统正常运行即可。

本文在保证减载操作造成的停电损失尽量小、所切负荷的单位调节功率尽可能小的基础上,引入了表征潮流转移对系统影响大小的潮流熵指标,构建了能够全面反映低频减载方案优劣的目标函数集。

1) 停电损失

随着现代社会对电力依赖程度的不断加深以及电力市场的蓬勃发展,用户对供电的可靠性与稳定性提出了更高的要求。作为能够客观描述供电中断带给社会影响大小的重要指标,停电损失一直是供电企业与研究人员关注的重点。本文将待优化轮次负荷切除造成的停电损失作为评价方案优劣的目标函数之一,表达如式(1)。

$$y_1 = \sum_{i=1}^{n_L} c_i L_i X_i \quad (1)$$

式中: y_1 表示负荷切除造成的停电损失; n_L 为参与本轮减载操作的负荷出线总数; c_i 表示出线 i 上的负荷是否参与本轮低频减载,参与设为 1,不参与设为 0; L_i 为出线 i 上的负荷量(MW); X_i 表示出线 i 上负荷的单位电能停电损失(万元/MW),这一数值主要取决于负荷的重要程度,其重要程度越高,单位电能停电损失也就越大^[16-17]。

2) 所切负荷的单位调节功率

在系统频率因大型机组跳机或联络线开断等事故出现严重跌落时,具有不同频率调节特性的负荷功率吸收量差别很大。根据文献[8,13]的分析研究,进行减载操作时应尽量先切除单位调节功率小的负荷,这样有利于减少剩余负荷的有功功率吸收量,使系统尽快实现有功功率平衡,频率尽早恢复至正常状态。因此,本文将所切负荷的单位调节功率大小作为评价方案优劣的目标函数之一,表示如式(2)。

$$y_2 = \sum_{i=1}^{n_L} \frac{c_i K_{Li^*} L_i}{f_N} \quad (2)$$

式中: y_2 表示所切负荷的单位调节功率; K_{Li^*} 为出线 i 上负荷的单位调节功率,以标么值表示; f_N 为系统的额定频率,取为 50 Hz。

3) 潮流转移熵

低频减载装置动作会引发各支路潮流的大规模转移,给系统带来很大冲击,使其运行条件进一步恶化^[18]。减载装置动作引发的支路潮流转移量越小,表明这一操作对系统造成的冲击影响越小,系统的安全稳定运行水平也就越高。本文引入潮流转移熵^[19]来对低频减载装置动作引起的潮流转移情况进行定量描述,以期减小潮流转移对系统造成的冲击影响,表示如式(3)。

$$y_3 = -C_T \sum_{j=1}^{n_B} \eta_j \ln \eta_j \quad (3)$$

式中: y_3 表示潮流转移熵; C_T 取为 $\ln 10$; n_B 为系统内的支路总数; η_j 表示低频减载装置动作对线路 j 造成的潮流冲击, 可通过下式计算得到, 即 $\eta_j = \Delta P_j / \sum_{j=1}^{n_B} \Delta P_j$, 其中 ΔP_j 为低频减载装置动作前后线路 j 上的潮流变化量。

1.2 约束条件

1) 机组出力约束

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (4)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (5)$$

式中, P_{Gi}^{\max} 、 P_{Gi}^{\min} 和 Q_{Gi}^{\max} 、 Q_{Gi}^{\min} 分别为机组 i 的有功出力上下限与无功出力上下限。

2) 线路潮流约束

$$P_i \leq P_{i\max} \quad (6)$$

式中, $P_{i\max}$ 为支路 i 允许通过的有功功率上限值。

3) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (7)$$

式中, U_i^{\max} 和 U_i^{\min} 分别为节点 i 允许的电压上下限。

4) 系统频率约束

$$f_{\min} \leq f_i \leq f_{\max} \quad (8)$$

式中: f_i 为进行第 i 轮低频减载操作后系统的稳态频率值; f_{\min} 和 f_{\max} 分别为系统稳态频率所允许的最小值和最大值。

2 基于 NSGA-II 算法的低频减载方案优化

本文采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[20]对此问题进行优化求解, 以期协调和处理好停电损失、所切负荷的单位调节功率和潮流转移熵三个目标函数间的关系。具体步骤如下。

1) 随机生成规模为 N 的初始种群, 每个染色体代表一种低频减载方案, 其中系统内能够参与本轮减载的负荷出线总数为 n , 则将染色体的长度设置为 n , 以 1 或 0 编码, 相应位置负荷出线参与本轮减载取 1, 不参与取 0。计算初始种群各目标函数的适应度值。

2) 依据个体的非劣解水平对其进行快速非支配排序, 以降低计算的复杂度。

3) 利用区间距离公式计算得到同层个体间的拥挤距离, 以此为依据对其进行比较排序。

4) 采用锦标赛制选择算子进行选择运算, 取出在分级排序中序号较小的个体; 当两个体序号相同

时, 则选择拥挤度较低的个体。

5) 为提高算法的局部和全局搜索能力, 采用模拟二进制交叉算子和正态变异算子对锦标赛制中选择出的种群进行交叉和变异操作, 得到子代种群 D_i 。

6) 引入精英进化策略, 保留父代中的优良个体与子代合并形成过渡种群 R_i , 对 R_i 中的个体进行优化排序, 得到新的父代种群。

7) 对优化所得的新的父代种群进行基因解码, 把基因个体逆转成为各条出线在本轮中参与低频减载的情况, 对得到的方案进行机组出力、线路潮流、节点电压和系统频率等约束条件的校验, 将不满足系统安全运行约束的方案利用罚函数剔除。

3 基于灰色关联分析模型的多属性决策

在求得一组 Pareto 最优解集后, 以所定义的三个目标变量 y_1 、 y_2 和 y_3 作为决策属性, 采用综合灰色系统理论及逼近思想的灰色关联分析模型^[21]进行多属性决策来确定最终的方案, 主要包括下述几个步骤。

1) 构造评价矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$, 其中 n 和 m 分别为备选方案与评价指标的个数, 并对其进行规范化处理得到 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$, 具体方法如下所述。

效益型指标

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

成本型指标

$$r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \quad 1 \leq i \leq n \quad (10)$$

2) 求得正理想解 $S^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+\}$, 其中 $r_j^+ = \max\{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}$, $j=1, 2, \dots, m$; 求得负理想解 $S^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-\}$, $r_j^- = \min\{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}$, $j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

3) 方案 i 与 S^+ 、 S^- 关于指标 j 的灰色关联系数可分别由式(11)与式(12)计算得到。

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|}{|r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|} \quad (11)$$

$$\xi_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|}{|r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|} \quad (12)$$

式中, ρ 为分辨系数, 通常取为 0.5。

4) 由灰色关联系数计算得到方案 i 与 S^+ 、 S^- 的灰色关联度分别为

$$\gamma_i^+ = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{ij}^+ \quad i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

$$\gamma_i^- = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{ij}^- \quad i=1,2,\dots,n \quad (14)$$

式中, 权重 ω_j 可由评价人员根据各指标对减载方案整体效果的影响给定。

5) 采用优属度 u_i 来评价方案 i 的优劣程度, 其

$$u_i = \frac{(\gamma_i^+)^2}{(\gamma_i^+)^2 + (\gamma_i^-)^2}。$$

4 算例分析

本文采用新英格兰 10 机 39 节点系统算例来验证所提优化方法的合理性与有效性, 其系统结构如图 1 所示。各机组的参数如表 1 所示, 表中的 P_N 、 P_G 、 H 和 R 分别表示机组的额定出力、实际出力、惯性常数和调差系数。各负荷节点及其出线参数如附录所示。参考文献[17]并结合电网运行经验, 设定 II、III 类负荷的单位电能停电损失分别为 18.5 万元/MW、3.1 万元/MW。通过 PSD-BPA 暂态稳定程序仿真得知: 在当前运行工况下, 系统出现 540 MW 有功功率缺额导致频率低于 49 Hz 持续时间达 0.2 s 时, 低频减载装置动作切除 115 ~135 MW 负荷可使频率恢复到正常运行状态。

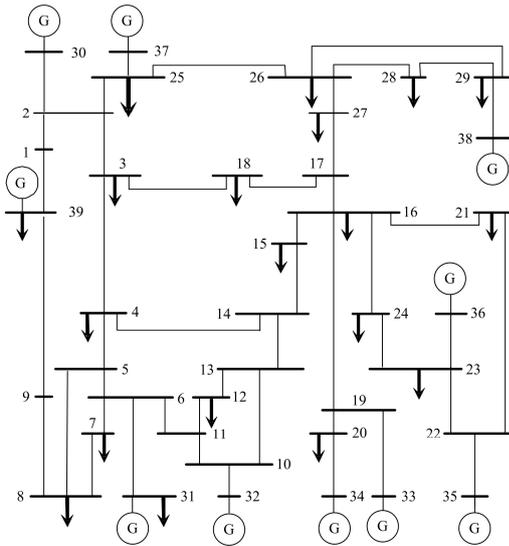


图 1 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 1 New England 10-unit 39-bus power system

多目标优化过程的求解基于所设置的下述参数: 种群粒子个数为 100, 每个粒子基因位数为 135(有 135 条出线能够参与本轮低频减载操作, 以 1 或 0 进行编码, 其中 1 代表参与, 0 代表不参与),

交叉、变异概率分别为 0.9 和 0.1, 迭代次数为 200。求得的 Pareto 最优解分布情况如图 2 所示。

表 1 各机组的参数设置

Table 1 Parameters of each unit

节点编号	P_N /MW	P_G /MW	H /s	R /%
30	400	250	42	4.5
31	800	600	30.3	5
32	650	650	35.8	5
33	650	632	28.6	5
34	550	508	26	5
35	650	650	26.4	5
36	560	560	34.8	5
37	540	540	24.3	5
38	900	830	34.5	5.01
39	1 000	1 000	1 000	5.01

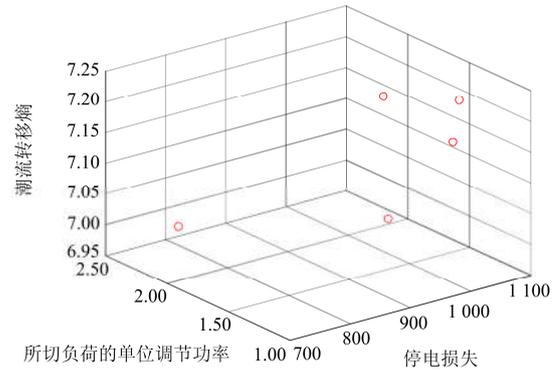


图 2 Pareto 解空间的分布图

Fig. 2 Spatial distribution of Pareto solutions

表 2 列出了与所得 Pareto 最优解相对应的 5 个互不支配低频减载方案, 其优劣程度无法直接判断。因此, 借助于综合灰色系统理论及逼近思想的灰色关联分析模型对其进行决策得到表征各方案优劣程度的优属度。由各方案的优属度可以得知, 方案 5 最为科学合理。

在表 2 所示的 5 个低频减载方案中, 方案 4 的切负荷量最小, 但方案 4 的各个目标函数值在 5 个方案中均非最优, 其整体效果亦并非最优。由此可知, 负荷切除量的大小并不能全面反映减载方案整体效果的优劣。

相较于方案 1, 方案 4 的停电损失与所切负荷的单位调节功率两指标要更好一些。但由于方案 4 中低频减载装置动作引起的潮流转移对系统造成的冲击影响明显大于方案 1, 表现在其潮流转移熵指标远小于方案 1, 导致其整体的恢复效果要差一些。可见, 在优化过程中考虑潮流转移对系统造成的冲击影响, 有利于获得更为科学完善的低频减载方案。

表 2 本轮次低频减载方案

Table 2 Low frequency load shedding scheme of this round

方案	参与本轮次低频减载的负荷节点及出线编号	停电损失/万元	所切负荷的单位调节功率/(MW/Hz)	潮流转移熵	优属度	负荷切除总量/MW
1	15(1),21(2),23(3),25(7),28(7)	939.1	1.412	7.245 5	0.521 8	127
2	15(1),16(5),23(3),27(4),28(7)	1 048.3	1.332	7.218 3	0.456 9	135
3	3(3),4(3),16(5),28(7)	792.2	2.356	6.986 1	0.465 7	131
4	3(3),16(5),27(4),28(7),31(2),39(12)	913.0	1.248	7.068 6	0.521 0	119
5	3(3),15(1),21(7),23(3),25(7),28(7)	988.2	1.088	7.187 6	0.557 7	121

注: 15(1)代表 15 号负荷节点的 1 号出线

为验证所提方法的合理性及所得减载方案的可行性, 基于 1 s 时出现 540 MW 有功功率缺额的故障场景, 采用上述低频减载策略, 得到了如图 3 所示的各减载方案下的频率动态曲线。由图中各曲线可知, 减小所切负荷的单位调节功率有助于改善系统频率的恢复提升效果。在当前故障场景下, 系统内的负荷及各台尚未满发电机组的频率调节作用使得最终的负荷切除量远小于功率缺额数值。由此可见, 设定各轮次的切负荷量时既要关注总的功率缺额, 也要考虑当前工况下系统内负荷与机组的频率调节能力。

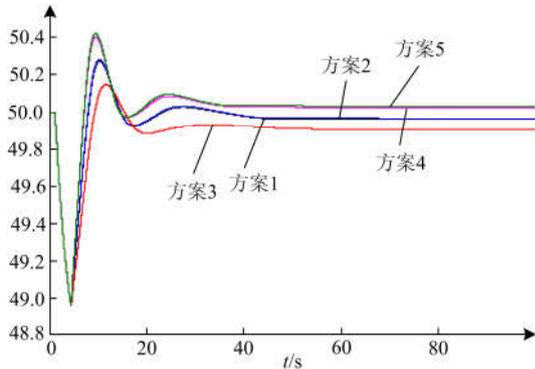


图 3 不同减载方案下的频率动态曲线

Fig. 3 Frequency dynamic curves under different load shedding schemes

本文提出的低频减载优化方法符合系统待优化轮次的减负荷量要求和装置的动作特点, 可以在使 I 类负荷免于切除的前提下合理表征 II、III 类负荷的供电中断给系统带来的停电损失, 同时能够保证当前轮次减载装置动作后剩余负荷的频率调节能力对系统的功率平衡更为有利、所引发的潮流转移对系统造成的冲击影响更小, 对于全面提高低频减载方案的实用性与安全性有较强的应用价值。

5 结论

本文综合考虑所切负荷的重要程度、频率调节特性与布点位置对低频减载方案整体效果的影响,

结合系统待优化轮次减负荷量的要求和装置的动作特点, 提出了一种考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化方法。以停电损失最小化、所切负荷的单位调节功率最小化和潮流转移熵最大化为优化目标, 综合考虑各种约束条件, 采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解出 Pareto 最优解集。然后通过灰色关联分析模型对各其进行多属性决策, 以确定出最科学合理的低频减载方案。最后, 采用新英格兰 10 机 39 节点系统算例验证了所提优化方法的合理性与有效性。

需要指出的是, 与现有的多数文献相类似, 本文研究的是基本轮的低频减载过程, 若采用此优化方法对减载方案的特殊轮进行设计整定, 应令文中的第二个目标函数即所切负荷的单位调节功率尽可能大, 以减小频率回升到正常值所需的时间^[22]。此外, 本文所提的优化方法可以实现减载过程中某一特定轮次负荷切除总量在各出线上的合理分配, 而未涉及轮次数及各轮次负荷切除量的总体优化调整。接下来的研究工作将会围绕这一问题展开, 以期全面提升低频减载方案的恢复效果。

附录

负荷节点及其出线参数

Appendix load buses and its outgoing line parameters

节点编号	出线编号	P_d /MW	Q_d /Mvar	II 类负荷百分比	III 类负荷百分比	K_{L*}
3	0	161	1.2	/	/	/
3	1	60	0.45	40	60	1.7
3	2	40	0.3	25	75	1.7
3	3	30	0.22	32	68	0.5
3	4	20	0.15	46	54	2.4
3	5	11	0.08	56	44	1.6
4	0	200	73.6	/	/	/
4	1	80	29.4	24	76	0.8
4	2	60	22.1	47	53	1.6
4	3	60	22.1	9	91	1.2
4	4	50	18.4	35	65	3.9
4	5	30	11	45	55	2.1

续表

节点 编号	出线 编号	P_d /MW	Q_d /Mvar	II类负荷 百分比	III类负荷 百分比	K_{L*}
4	6	20	7.4	62	38	1.9
7	0	69.8	25.2	/	/	/
7	1	50	18	58	42	2.5
7	2	45	16.2	35	65	1.1
7	3	35	12.6	28	72	3
7	4	20	7.2	19	81	2.5
7	5	14	5	23	77	1.3
8	0	183	61.6	/	/	/
8	1	75	25.3	47	53	2
8	2	65	21.9	51	49	0.9
8	3	50	16.9	76	24	1.8
8	4	50	16.9	43	57	2
8	5	40	13.5	30	70	1.3
8	6	30	10.1	26	74	1.4
8	7	17	5.7	20	80	2.5
8	8	12	4	58	42	0.7
12	0	0.9	9.3	/	/	/
12	1	4	41.4	34	66	2.3
12	2	2	20.7	61	39	2.9
12	3	1.6	16.6	28	72	4.1
15	0	160	76.5	/	/	/
15	1	48	23	34	66	0.3
15	2	40	19.1	36	64	2.5
15	3	28	13.4	63	37	2.2
15	4	26	12.4	52	48	2.6
15	5	18	8.6	72	28	1.5
16	0	65.8	6.5	/	/	/
16	1	60	5.9	63	37	2.6
16	2	52	5.1	90	10	2.5
16	3	45	4.4	38	62	0.4
16	4	40	3.9	44	56	2.8
16	5	36	3.5	18	82	0.8
16	6	20	2	29	71	4
16	7	10	1	53	47	0.4
18	0	31.6	6	/	/	/
18	1	46	8.7	33	67	1.8
18	2	36	6.8	60	40	0.7
18	3	24	4.6	40	60	1.6
18	4	14	2.7	65	35	4.2
18	5	6	1.1	22	78	2.1
20	0	204	30.9	/	/	/
20	1	85	12.9	17	83	1.9
20	2	70	10.6	42	58	2.8
20	3	62	9.4	20	80	1
20	4	55	8.3	76	24	3.4
20	5	49	7.4	68	32	0.6
20	6	45	6.8	52	48	0.8

续表

节点 编号	出线 编号	P_d /MW	Q_d /Mvar	II类负荷 百分比	III类负荷 百分比	K_{L*}
20	7	30	4.5	42	58	1.4
20	8	30	4.5	30	70	3.4
20	9	20	3	47	53	0.5
20	10	20	3	80	20	0.3
20	11	10	1.5	38	62	1.4
21	0	110	46	/	/	/
21	1	54	22.7	44	56	1.9
21	2	40	16.8	18	82	0.8
21	3	32	13.4	29	71	2.7
21	4	16	6.7	53	47	3.1
21	5	10	4.2	33	67	5
21	6	8	3.4	60	40	0.6
21	7	4	1.7	50	50	0.2
23	0	86.5	29.6	/	/	/
23	1	51	17.4	45	55	2.8
23	2	36	12.3	22	78	3.5
23	3	30	10.3	27	73	0.5
23	4	22	7.5	42	58	2.5
23	5	14	4.8	20	80	1.3
23	6	8	2.7	56	44	2.4
24	0	154.6	-46.1	/	/	/
24	1	45	-13.4	68	32	0.9
24	2	38	-11.4	52	48	2.2
24	3	32	-9.6	42	58	1.4
24	4	18	-5.4	30	70	0.7
24	5	9	-2.7	77	23	1.7
24	6	7	-2.1	32	68	1.3
24	7	3	-0.9	46	54	3.6
24	8	2	-0.6	51	49	2.1
25	0	67	14.2	/	/	/
25	1	52	11	24	76	1.9
25	2	36	7.6	47	53	1.5
25	3	28	5.9	19	81	2.1
25	4	20	4.2	35	65	3.2
25	5	10	2.1	45	55	2.7
25	6	7	1.5	52	48	1.1
25	7	4	0.8	5	95	1.8
26	0	63	7.65	/	/	/
26	1	24	2.9	55	45	0.8
26	2	20	2.4	38	62	1.7
26	3	14	1.7	19	81	2.2
26	4	8	1	66	34	1.1
26	5	4	0.5	32	68	1.5
26	6	4	0.5	24	76	2.8
26	7	2	0.2	52	48	0.9
27	0	155	41.5	/	/	/
27	1	35	9.4	23	77	2.1

续表

节点 编号	出线 编号	P_d /MW	Q_d /Mvar	II类负荷 百分比	III类负荷 百分比	K_{L*}
27	2	30	8.1	68	32	2.2
27	3	25	6.7	49	51	4.3
27	4	16	4.3	40	60	0.4
27	5	8	2.1	27	73	2.4
27	6	7	1.9	56	44	2.2
27	7	3	0.8	39	61	2.7
27	8	2	0.5	15	85	1.7
28	0	72	9.7	/	/	/
28	1	35	4.7	30	70	2.3
28	2	28	3.8	36	64	2.4
28	3	22	2.9	68	32	0.5
28	4	18	2.4	52	48	2.7
28	5	12	1.6	42	58	0.7
28	6	10	1.3	30	70	4
28	7	5	0.7	47	53	0.4
28	8	4	0.5	70	30	1.8
29	0	141.5	13.45	/	/	/
29	1	42	4	38	62	0.7
29	2	31	2.9	34	66	1.8
29	3	26	2.5	28	72	4.3
29	4	18	1.7	35	65	2.1
29	5	11	1	45	55	1.8
29	6	8	0.8	64	36	2.8
29	7	6	0.6	58	42	1.2
31	0	0.2	0.1	/	/	/
31	1	4	2	50	50	3.4
31	2	3	1.5	38	62	0.5
31	3	2	1	29	71	0.7
39	0	333	75	/	/	/
39	1	85	19.2	23	77	1.4
39	2	80	18.1	47	53	3.5
39	3	72	16.3	51	49	0.8
39	4	72	16.3	76	24	0.3
39	5	64	14.5	43	57	1.4
39	6	60	13.6	30	70	0.9
39	7	55	12.5	26	74	1.8
39	8	46	10.4	22	78	2.7
39	9	46	10.4	58	42	3.5
39	10	35	7.9	34	66	5
39	11	33	7.5	41	59	0.6
39	12	29	6.6	28	72	0.3
39	13	26	5.9	74	26	2.6
39	14	22	5	36	64	3.4
39	15	18	4.1	53	47	0.5
39	16	15	3.4	21	79	2.3
39	17	7	1.6	43	57	2.4
39	18	4	0.9	62	38	1.6
39	19	2	0.5	10	90	3.1

注：0号出线为各节点含 I 类负荷出线的集合

参考文献

[1] 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S].

[2] SAMET H, RASHIDI M. Coordinated under frequency load and capacitor shedding for bulk power systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2013, 7(8): 799-812.

[3] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.

[4] DELFINO B, MASSUCCO S, MORINI A, et al. Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes[C] // Power Engineering Society Summer Meeting, July 15-19, 2001, Vancouver, Canada: 307-312.

[5] SANAYE-PASAND M, DAVARPANAH M. A new adaptive multidimensional load shedding scheme using genetic algorithm[C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 1-4, 2005, Saskatoon, Canada: 1974-1977.

[6] GIRGIS A A, PETERSON W L. Adaptive estimation of power system frequency deviation and its rate of change for calculating sudden power system overloads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 585-594.

[7] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 基于多代理技术的低频低压减负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 1-5.

HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of UFLS/UVLS based on multi-agent technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 1-5.

[8] 熊小伏, 周永忠, 周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 48-51.

XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi. Study of underfrequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.

[9] 刘少华, 王超, 安军, 等. 计及频率静特性的低频减载方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 140-144.

LIU Shaohua, WANG Chao, AN Jun, et al. Study of under-frequency load shedding scheme based on frequency static characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 140-144.

- [10] 高学民, 么莉, 张辉, 等. 基于负荷频率特性的低频减载方案优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 82-88.
GAO Xuemin, YAO Li, ZHANG Hui, et al. Under frequency load shedding scheme optimization based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 82-88.
- [11] 侯王宾, 刘天琪, 李兴源. 基于综合权值和广域测量的低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 70-75.
HOU Wangbin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Under-frequency load shedding based on comprehensive weight and wide area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 70-75.
- [12] 柏丹丹, 和敬涵, 王小君, 等. 基于灰色关联分析的自适应低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 20-25.
BAI Dandan, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Adaptive UFLS scheme based on grey correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 20-25.
- [13] 李顺, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于 WAMS 的自适应低频减载动态优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 48-54.
LI Shun, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. WAMS based dynamic optimization of adaptive under-frequency load shedding[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 48-54.
- [14] 李蕊, 李跃, 苏剑, 等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 170-176.
LI Rui, LI Yue, SU Jian, et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 170-176.
- [15] 柏丹丹. 基于信息共享的智能电网低频减载优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
BAI Dandan. Study on UFLS optimization based on the sharing information in the smart grid environment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [16] 李亚男, 顾雪平, 钟慧荣. 考虑负荷类型及停电损失的负荷恢复策略优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 6-12.
LI Yanan, GU Xueping, ZHONG Huirong. Optimization of load recovery plans considering different load types and outage cost[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2012, 39(3): 6-12.
- [17] 刘文轩, 顾雪平, 李少岩. 考虑机组重要度和负荷停电损失的网架重构分层协调优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 22-32.
LIU Wenxuan, GU Xueping, LI Shaoyan. Hierarchical coordinative optimization for network reconfiguration considering unit importance and the load outage loss[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2017, 44(2): 22-32.
- [18] 闫常友, 周孝信, 康建东, 等. 潮流转移灵敏度及安全评估指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 7-13.
YAN Changyou, ZHOU Xiaoxin, KANG Jiandong, et al. Flow transferring sensitivity and security index analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 7-13.
- [19] 靳冰洁, 张步涵, 王珂. 基于熵理论的电力系统最优潮流均衡度分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 80-86.
JIN Bingjie, ZHANG Buhan, WANG Ke. Entropy theory based optimal power flow balancing analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 80-86.
- [20] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [21] 徐玉琴, 李文帅, 赵蓓蓓. 一种大电源接入电网接入点选取合理性的评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 94-100.
XU Yuqin, LI Wenshuai, ZHAO Beibei. An evaluation method for the rationality of the voltage level of a large power supply connected to the power network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 94-100.
- [22] 王丽君. 考虑负荷频率调节系数的低频减载方案研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2007, 3(3): 242-244.
WANG Lijun. Study of low frequency load shedding project considering load frequency regulation coefficient[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2007, 3(3): 242-244.

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2018-01-04

作者简介:

李鹏飞(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、高压直流输电技术; E-mail: lpf_kx@163.com

顾雪平(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用。E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)