

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210207

考虑配网负荷曲线特性的低频减载执行方案调整方法

高剑¹, 朱童¹, 罗异³, 尹琦², 丁睿², 喻伟², 李思思³, 叶倩²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000;
3. 北京清能互联科技有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:在我国交直流电网互联规模及新能源发电并网容量持续扩大背景下,系统发电侧面临的有功缺额风险增加,这对电网第三道保护防线低频减载方案在地市电网的执行可靠性提出了更高的要求。针对现有执行方案轮次线路调整方法下执行合格率较低、稳定性较差及时效有限的不足,提出一种考虑配网线路负荷特性的轮次线路调整方法。基于低频减载方案设计执行评价指标,建立执行方案线路调整优化0-1整数规划模型,并加入考虑线路相对全网负荷曲线趋势相似性及线路负荷曲线波动性的诱导函数,实现算法流程设计。基于实际工程案例进行实证分析,证明了所提方法下轮次执行合格率及稳定度、应用时效相对现有方法均更优。通过建立低频减载执行方案评估决策系统,有效提升执行方案管理智能化水平,对地市电网低频减载执行方案的调整优化具有一定的参考意义。
关键词: 低频减载; 配网线路负荷特性; 趋势相似性; 曲线波动性; 诱导函数

Adjustment method for a low frequency load shedding implementation scheme considering load curve characteristics of a distribution network

GAO Jian¹, ZHU Tong¹, LUO Yi³, YIN Qi², DING Rui², YU Wei², LI Sisi³, YE Qian²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Deyang Power Supply Company, Deyang 618000, China; 3. Beijing Tsintergy Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Given the continuous expansion of the AC/DC power grid interconnection scale and capacity connected with grid generated by new energy, the generation side is facing an increasing risk of active power shortage. This then brings higher requirements for the implementation reliability of the third line of defense low frequency load shedding scheme in a local power grid. There are shortcomings of the round load adjustment methods for the existing implementation scheme, such as low qualified rate, poor stability and poor timeliness. Thus this paper proposes a round load adjustment method considering the load characteristics of distribution network lines. Based on the low frequency load shedding scheme, the implementation evaluation indices are designed, and an 0-1 integer programming optimization model of implementation scheme line adjustment is established with the induction function that considers the similarity and distribution network line load curve fluctuation. Then the flow design of the algorithm is realized. Empirical analysis based on the actual project shows that the proposed method is better than the existing methods in terms of round implementation qualification rate, stability and application time. By establishing the evaluation and decision-making system of the implementation scheme of the low frequency load shedding, the intelligent level of the implementation management is effectively improved. This has significance for the adjustment and optimization for the implementation scheme of the low frequency load shedding of the local power grid.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52199720003Q).

Key words: low frequency load shedding; distribution network load characteristics; trend similarity; curve volatility; induced function

0 引言

在我国电网互联规模不断扩大、清洁能源发电

渗透率持续提升背景下,电力系统运行经济性提升的同时其复杂性增强,受电端发生大功率缺额风险增加^[1-2],在大容量机组甩负荷或直流输电紧急闭锁时功率缺额将影响频率稳定^[3-7]。低频减载属于电网第三道保护防线,在出现大功率缺额时通过迅速有序切除部分负荷,实现新的发用功率平衡,防止频率快速跌落甚至大面积停电^[8-11]。

基金项目: 国网总部科技项目资助(52199720003Q); 国网四川省电力公司科技项目资助“四川多直流异步联网外送稳定特性分析及控制措施研究”(52199919007B)

面对电网发展新形势, 相关研究主要针对省级区域电网低频减载方案展开, 以提升实用性、经济性 & 可靠性为目标^[12]。工程应用方面, 我国电网采用“逐次逼近”减载方案为主流, 并相继有利用频率变化率和低频越限启动配合的半自适应法及利用频率响应模型的自适应法投入应用案例^[13]。经济性方面, 文献[14]考虑有功电压特性及负荷重要性, 设计减载贡献因子, 逐轮次动态优化减载量以减少负荷切除量。文献[15]引入单位负荷因子, 提出综合代价最优切负荷模型, 通过不同切负荷点优化分配优先切除受扰动严重、负载率低的负荷。文献[16]提出基于自适应惯性权重混沌粒子群的减载优化整定算法, 以减载量最小为目标并加入频率约束条件, 得到单机及多机故障时优化后各节点切负荷量。文献[17]基于等效转子运动方程得到功率缺额下所需最小减载量。可靠性方面, 文献[18]提出考虑负荷水平及有功备用的低频减载在线整定算法, 相比传统模型能充分调动系统旋转备用并减少减载量。文献[19]采用随机与固定相结合方式定义负荷优先级以增加减载灵活性, 结合频率变化率制定减载方案, 分别在孤岛系统、发电机闭锁及负荷增加场景下验证了其有效性。文献[20]分析含水电系统功率缺额后频率变化特性, 结合水锤效应影响提出适当加大减载轮次间级差的关键参数优化方法。文献[21-22]针对高风电渗透率电网提出缩短动作频差和延时策略, 分区制定切负荷比例, 保证频率快速恢复前提下负荷切除量减少。文献[23]提出神经网络结合潮流追踪技术的减载方案制定方法, 估计功率缺额并通过潮流追踪技术及节点负荷频率调节系数实现不同重要程度切负荷点差异处理。文献[24]基于频率动态量测值, 提出减载方案连续动态调整方法。

上述方法针对新形势下我国电网对低频减载方案动态化自适应调整需求, 从不同角度提供了有益的参考, 但已有成果主要面向省级电网全网低频减载方案差异化、动态化调整, 以制定电网不同运行场景下的区域最优减载方案, 对于省级调度中心动态化调整本区域减载轮次、动作频率和整定时延以及控制减载比例策略提供了支撑, 以解决现有按年度编制低频减载方案难满足系统安全稳定运行要求的难题。但在工程落地层面, 地市电网需要根据省调下达减载方案结合本地区负荷水平、分布以及用户重要性, 在配网层面制定低频减载执行方案(以下简称“执行方案”), 分配各减载轮次具体可切线路以满足控制减载要求, 通过现场保护装置整定以投入减载负荷。目前地市电网主要通过人工方式开展执行方案调整与管理, 方案生成周期长且未充

分考虑配网线路负荷特性, 在实时维度上难以具备较强适应性, 实时控制减载量难达到要求, 执行方案调整频度高, 需要通过人工方式对现场装置定值进行频繁调整, 人力物力及时间成本投入大。这与要求其具备快速高效响应省调减载方案动态化调整需求的能力相悖, 给动态化下达的减载方案有效落地带来了较大困难, 而目前鲜见有关执行方案调整思路和方法的技术报导。

本文针对地市电网执行方案, 设计执行减载合格率、控制切负荷偏差率及负荷控制稳定度指标。提出考虑配网负荷曲线特性的执行方案, 调整思路并建立线路调整整数规划数学模型。通过算法实现轮次线路快速组合并保证减载执行可靠性。根据四川电网某低频减载方案, 以德阳电网为工程案例, 采用所提方法与平均负荷法下所得执行方案投入减载情况对比, 验证所提方法在合格率、稳定度以及应用时效上的优势, 以证明本文方法能在减载执行层面快速高效响应省级调度中心减载方案动态化调整及管理需求, 确保其有效实施。并研发评估决策生产应用系统, 以提升地市电网执行方案管理数字化、智能化水平, 对保证新形势下电网安全稳定第三道保护防线可靠性意义较大。

1 低频减载执行方案评价指标

1.1 执行减载合格率计算

低频减载方案按整定动作频率、延时分为多个基本轮和特殊轮, 在日 96 时刻点负荷曲线维度实时计算各点各轮次控制可切负荷量, 得到各轮次各点控制负荷相对地市全网负荷比例, 根据省调减载方案规定的控制比例及允许偏差, 实现减载执行方案轮次合格率计算。

1) 控制切负荷比例计算

$$\sigma_{j,n} = \frac{P_{j,n}}{P_{t,n}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{j,n}$ 表示轮次 $j(j=1,2,\dots,w, w$ 为轮次总数) 在 $n(n=1,2,\dots,96)$ 时刻点的实时控制切负荷比例; $P_{t,n}$ 表示 n 时刻点全网总负荷; $P_{j,n}$ 表示轮次 j 在时刻点 n 的控制切负荷量, 计算公式如式(2)。

$$P_{j,n} = \sum_{m=1}^l P_{j,n,m} \quad n=1,2,\dots,96 \quad j=1,2,\dots,w \quad (2)$$

式中, $P_{j,n,m}$ 表示轮次 j 中第 $m(m=1,2,\dots,l)$ 条线路在时刻点 n 的负荷量。

2) 控制切负荷合格率判定

以各轮次要求以控制下限比例为基准得到实际

控制切负荷比例归一化值作为负荷控制率。

$$\eta_{\text{control},j,n} = \frac{\sigma_{j,n}}{\sigma_{j,\text{demand}}} \quad (3)$$

式中: $\eta_{\text{control},j,n}$ 表示轮次 j 在时刻点 n 的负荷控制率; $\sigma_{j,\text{demand}}$ 表示减载方案要求轮次 j 控制的切负荷比例下限。以 $\eta_{\text{control},j,n}$ 作为轮次 j 在 n 点控制负荷是否合格的依据, 当 $\eta_{\text{control},j,n}$ 在 1 到允许的控制切负荷比例上限所对应倍数 v 之间时, 该点控制减载量为合格。用 $\text{result}_{j,n}$ 表征轮次 j 在 n 点控制负荷评价结果。

$$\text{result}_{j,n} = \begin{cases} \text{控制负荷欠量} & \eta_{\text{control},j,n} < 1 \\ \text{控制负荷量合格} & 1 \leq \eta_{\text{control},j,n} \leq v \\ \text{控制负荷过量} & \eta_{\text{control},j,n} > v \end{cases} \quad (4)$$

基于该评价标准, 计算每日 96 时刻点维度下执行方案控制切负荷合格时刻点百分占比作为每日执行合格率。

1.2 控制切负荷偏差率计算

由于缺乏海量数据下快速有效的分析方法, 传统方法以全网及线路单一统计负荷为基准实现各轮次线路配置, 但线路负荷实时变动且存在特性差异, 按满足单一负荷水平下各轮次控制切负荷量所配置执行方案投入现场后, 后续各轮次控制切负荷量实时变化, 难以在曲线维度实时保证控制切负荷合格率, 为体现各轮次切负荷控制率偏差程度并允许一定裕度, 采用控制偏差率 $\Delta\sigma_{j,n}$ 进行评价。

$$\Delta\sigma_{j,n} = \sigma_{j,n} - \frac{1+v}{2} \cdot \sigma_{j,\text{demand}} \quad (5)$$

式中, $\Delta\sigma_{j,n}$ 越小表明所控制切负荷比例越接近减载方案要求控制的比例上下限中间值, 允许控制负荷上下偏差裕度更大, 其抗负荷波动能力更强。

1.3 切负荷控制稳定度评价

以每日负荷控制率波动幅度相对要求的负荷控制率上下限变动幅度区间长度比例进行切负荷控制稳定度 α 量化计算。

$$\alpha = \frac{\eta_{j,\text{max}} - \eta_{j,\text{min}}}{v - 1} \quad (6)$$

式中: $\eta_{j,\text{max}}$ 、 $\eta_{j,\text{min}}$ 分别表示轮次 j 每日的最大、最小负荷控制率; α 越小说明方案越稳定。

2 低频减载执行方案调整优化方法

2.1 执行方案轮次线路调整思路

为满足实时维度下减载执行方案投入减载合格率, 需要各轮次组合线路总计投入负荷实时满足减载要求, 本文以典型曲线为基准, 充分考虑曲线负荷特性, 解决采用单一统计负荷为基准调整执行方

案时其难以具备较高执行合格率的问题。

为保证执行方案调整效率、应用时效及稳定度, 考虑线路负荷相对全网负荷曲线趋势跟踪能力及负荷自身波动, 设计相关系数及负荷曲线波动率。

1) 配网线路与全网负荷曲线趋势相似度

以 $\mathbf{P}_{ja} = (P_{ja1}, P_{ja2}, \dots, P_{ja96})$ 表示以轮次 j 中线路 a 某日 96 点负荷中最大负荷为基准的 96 点标幺向量, $P_{j\text{ave}}$ 为平均值。以 $\mathbf{P}_{ta} = (P_{ta1}, P_{ta2}, \dots, P_{ta96})$ 表示以全网负荷同日 96 点负荷中最大负荷为基准的 96 点标幺向量, $P_{t\text{ave}}$ 为平均值。两曲线相关系数 r 计算方法为

$$r = \frac{\sum_{k=1}^{96} (P_{jak} - P_{j\text{ave}})(P_{tak} - P_{t\text{ave}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{96} (P_{jak} - P_{j\text{ave}})^2 \sum_{k=1}^{96} (P_{tak} - P_{t\text{ave}})^2}} \quad (7)$$

式中, r 越大的线路对全网负荷趋势跟随能力更强。

2) 负荷曲线趋势波动率 α_p 计算

采用某线路日平均负荷与某时段 x 日内平均负荷的偏差波动情况计算负荷波动率。

$$p_{\text{dave},i} = \sum_{k=1}^{96} p_{d,ik} / 96 \quad i=1,2,\dots,x \quad k=1,2,\dots,96 \quad (8)$$

式中: $p_{\text{dave},i}$ 表示某线路第 i 日平均负荷, $p_{d,ik}$ 表示第 i 日第 k 个时刻点的负荷。

$$\alpha_p = \frac{\sum_{i=1}^x \sqrt{\left(\frac{p_{\text{dave},i} - p_{\text{ave}}}{p_{\text{ave}}} \right)^2}}{x} \quad (9)$$

式中, p_{ave} 表示 x 日内平均负荷。

以单个轮次为例, 设计考虑负荷特性实现轮次整定线路组合的精细化调整思路如图 1 所示。

设参考基准日期时间段为 x , 以 x 日内所有备选配网线路及全网系统负荷为基础数据, 分别计算各时刻点在 x 日内平均负荷得到平均统计意义下典型曲线, 将全网系统典型负荷曲线以 $(1+v)/2$ 比例折算后得到要求控制的参考负荷曲线, 以在典型曲线标准下该轮次实际投入减载量相对参考控制负荷偏差最小为目标。以日为单位计算 r 以及 α_p , 取平均值 r_{av} 、 α_{pav} 作为平均相似度以及曲线波动率指标并排序。采用两阶段法进行轮次线路调整。

① 第一阶段: 按 r_{av} 、 α_{pav} 分别由高到低及由小到大优先选取线路加入轮次, 该部分累计负荷作为要求控制切负荷主要成分, 以保证轮次控制负荷稳定性及跟随全网负荷趋势变化能力, 当累计负荷峰谷差大于要求控制曲线峰谷差时结束该阶段。

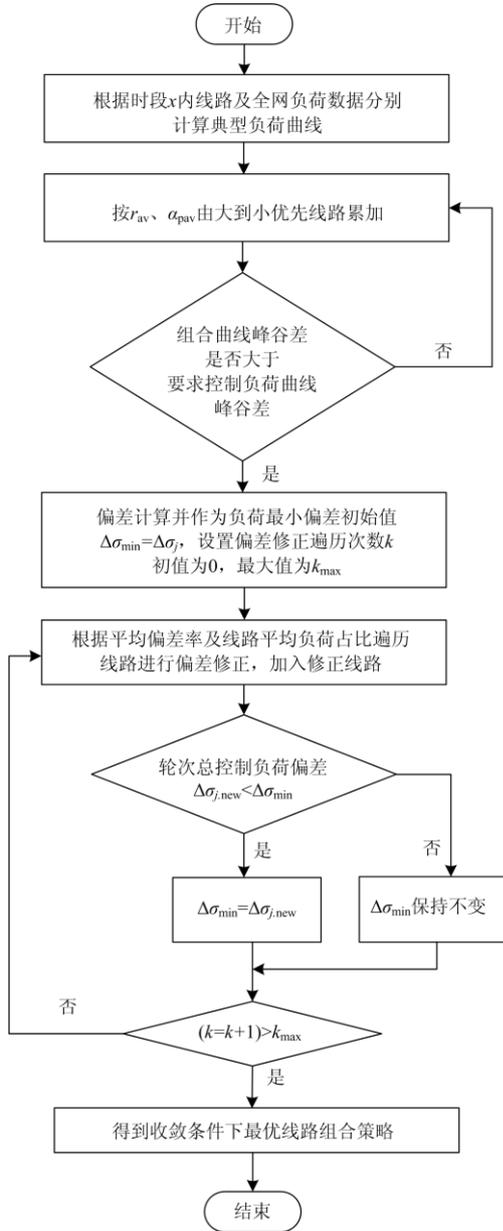


图 1 低频减载执行方案轮次线路调整流程

Fig. 1 Loads adjusting process of each round for low frequency load shedding implementation scheme

② 第二阶段：计算第一阶段的切负荷平均控制偏差率，同时根据各线路负荷对全网负荷平均占比，在剩余线路中选取负荷平均占比与平均控制偏差率对应的线路组进行偏差修正，使得在收敛条件下控制负荷平均偏差率达到最小。

图 1 中 $\Delta\sigma_j$ 表示在第一阶段线路累加后的平均控制负荷偏差率。

2.2 轮次线路调整优化模型

根据图 1 所梳理分阶段线路组合细化流程，建

立执行方案轮次线路组合整数规划优化数学模型。

由于系统负荷为所有负荷综合累加，单条线路负荷趋势难以完全跟踪系统负荷趋势，通过实践，在第一阶段按曲线趋势优先选取线路存在低谷和高峰控制量分别低于下限和超出上限现象，因此增加峰谷差约束，并在第二阶段选取对应特性线路进行偏差修正。因此，第一阶段考虑峰谷差及第二阶段进行偏差修正均为了典型曲线标准下最小化组合线路累计控制负荷与要求控制参考负荷偏差，因此以两者相对偏差绝对值最小为目标，建立减载执行方案多轮次调整优化目标函数如式(10)。

$$\text{Min} \left(\sum_{j=1}^w \sum_{n=1}^T (\Delta E_{1j,n} + \Delta E_{2j,n}) \right) \quad (10)$$

式中： $\Delta E_{1j,n}$ 表示第 j 轮次在 n 时刻控制负荷与要求控制负荷之间的正偏差； $\Delta E_{2j,n}$ 表示第 j 轮次在 n 时刻控制负荷与要求控制负荷之间的负偏差； T 为总时段； w 为轮次总数。

其中

$$\begin{cases} \Delta E_{1j,n} = \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \frac{1+v}{2} \cdot P_{i,n} - \sum_{i=1}^m L_{\text{line}} L_{\text{load}i,n} \cdot \alpha_{i,j} \\ \Delta E_{2j,n} = \sum_{i=1}^m L_{\text{line}} L_{\text{load}i,n} \cdot \alpha_{i,j} - \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \frac{1+v}{2} \cdot P_{i,n} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\alpha_{i,j}$ 表示线路被切状态变量，为 0 时表示线路 i 不纳入执行，为 1 时表示线路 i 按轮次 j 动作频率及时延投入减载整定保护； $L_{\text{line}} L_{\text{load}i,n}$ 表示线路 i 典型负荷曲线时刻 n 对应负荷； $\Delta E_{1j,n}$ 表示轮次在时刻 n 按规定控制减载平均比例折算的时刻 n 控制负荷减去实际控制减载量的偏差，要求 $\Delta E_{1j,n}$ 小于按规定控制减载平均比例折算的时刻 n 控制负荷减去按规定控制减载比例下限折算的时刻 n 控制负荷所得的容许偏差； $\Delta E_{2j,n}$ 表示轮次在时刻 n 实际控制减载量减去按规定控制减载平均比例折算的时刻 n 控制负荷的偏差，要求 $\Delta E_{2j,n}$ 小于按规定控制减载比例上限折算的时刻 n 控制负荷减去按规定控制减载平均比例折算的时刻 n 控制负荷所得的容许偏差。

为考虑按图 1 第一阶段优先加入配网线路与全网负荷曲线趋势相似性高以及线路自身负荷曲线波动性小的线路，在式(10)目标函数中加入诱导函数，实现线路按 r_{av} 、 α_{pav} 分别由高到低以及由小到大优先选取，令 $\text{index} = k_1 r_{\text{av}} + k_2 (1/\alpha_{\text{pav}})$ ， k_1 、 k_2 分别表示两个指标占的权重。参考文献[25]整数规划标准模型，建立执行方案轮次线路调整的整数规划模型

如式(12)。

$$\begin{aligned} & \text{Min} \left(\sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^T (C_j^R \Delta E_{1,j,n} + C_j^R \Delta E_{2,j,n}) + k_3 \cdot \mathbf{r}_{\text{rank}_j} \cdot \boldsymbol{\alpha}_j \right) \\ & \text{s.t.} \\ & \begin{cases} \sum_{i=1}^m L_{\text{line}} L_{\text{load},i,n} \alpha_{i,j} + \Delta E_{1,j,n} - \Delta E_{2,j,n} = \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \frac{1+\nu}{2} \cdot P_{t,n} & n=1,2,\dots,T \\ 0 \leq \Delta E_{1,j,n} \leq \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \left(\frac{1+\nu}{2} - 1\right) \cdot P_{t,n} & n=1,2,\dots,T \\ 0 \leq \Delta E_{2,j,n} \leq \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \left(\nu - \frac{1+\nu}{2}\right) \cdot P_{t,n} & n=1,2,\dots,T \\ \Delta E_{1,j,n} = \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \frac{1+\nu}{2} \cdot P_{t,n} - \sum_{i=1}^m L_{\text{line}} L_{\text{load},i,n} \alpha_{i,j} & n=1,2,\dots,T \\ \Delta E_{2,j,n} = \sum_{i=1}^m L_{\text{line}} L_{\text{load},i,n} \alpha_{i,j} - \sigma_{j,\text{demand}} \cdot \frac{1+\nu}{2} \cdot P_{t,n} & n=1,2,\dots,T \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{r}_{\text{rank}_j}$ 表示各线路按综合指数 index 由大到小排列顺序后的排序向量，为 1 行 m 列行向量； $\boldsymbol{\alpha}_j = (\alpha_{1,j}, \alpha_{2,j}, \dots, \alpha_{m,j})^T$ 为各线路是否按轮次 j 动作频率及时延投入的标记向量，为 m 行 1 列向量； C_j^R 为偏差系数； k_3 为排序向量与线路状态变量乘积系数。两个系数用于调整目标函数两项所占成分大小。

2.3 算法求解

式(12)所示模型待求解变量为 $\alpha_{i,j}$ ， $\alpha_{i,j}$ 取值为 0 或 1，其为一 0-1 整数规划模型。输入基准典型负荷曲线、减载方案规定轮次控制切负荷上下限比例以及计算得到 x 日内各线路日平均相似度以及平均曲线波动率 r_{av} 、 α_{pav} ，建立式(12)所示线路组合 0-1 规划模型，将其转化为线性规划模型可实现求解。

商用求解器 CPLEX 混合整数优化程序可以在较短的时间内解决多变量的复杂的混合整数规划问题，尤其是其中的混合整数优化程序对很多实际的混合整数规划问题的求解都行之有效，因此本文应用求解器 CPLEX 实现轮次线路组合的求解，计算流程如图 2 所示。

在备选线路集较充分情况下，可实现满足式(12)减载控制偏差约束条件的解的输出，当备选线路非常有限，难以 96 点满足约束条件时，可通过对减载偏差约束适当进行约束松弛，可得到在有限线路选择范围内在典型曲线基准线执行合格率达到上限的线路组合输出。

3 实证分析与验证

3.1 基础数据选取

以四川电网某低频减载方案为依据，该方案根据整定频率和时延将低频减载方案分为 8 个轮次，其中 5 个基本轮次，3 个特殊轮次，如表 1 所示。

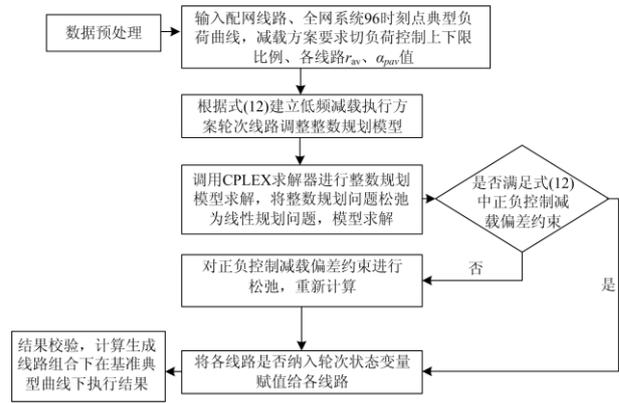


图 2 线路优化调整算法流程

Fig. 2 Algorithm flow of line load optimization and adjustment

表 1 四川电网某低频减载方案

Table 1 One scheme of low frequency load shedding of Sichuan Power Grid

轮次	动作频率/Hz	动作延时/s	减载比例/%
基 1 轮	49	0.15	6.0
基 2 轮	48.75	0.15	5.8
基 3 轮	48.5	0.15	5.8
基 4 轮	48.25	0.15	5.8
基 5 轮	48	0.15	5.8
特 1 轮	49.25	10	2.4
特 2 轮	49.25	15	1.7
特 3 轮	49.25	20	1.7

特殊轮控制减载比例较小，因此调整难度大，本文选取特 3 轮进行测试以验证所提方法有效性， $\sigma_{j,\text{demand}} = 1.7\%$ ， $\nu = 1.25$ 。

以四川德阳电网 472 条可用于减载 10 kV 配网线路及全网系统负荷由 2020 年 11 月 10 日至 12 月 30 日共 50 天 96 点负荷数据进行测试，采用传统平均负荷法和本文方法进行对比，以 11 月 10 日至 30 日共 21 日数据为方案编排基础数据，以 12 月 1 日至 30 日进行执行方案控制减载测试。

3.2 对比分析

分别采用平均负荷法和本文方法完成特 3 轮线路组合，对比两种方法下特 3 轮控制负荷减载执行情况。

1) 采用平均负荷法，以各线路及全网系统负荷 11 月份共 21 日的日平均负荷为参照，采用日平均负荷按要求的平均控制负荷比例 1.9125% 进行折算，得到低频减载方案特 3 轮要求控制切负荷总量为 29.278 54 MW，按各线路日均负荷进行线路组合，使得组合线路总的日平均负荷为 29.31 MW，两者基本吻合，实现线路组合 1，共 15 条线路。

2) 按本文方法, 通过测试, r_{av} 、 α_{pav} 分别取权重 k_1 、 k_2 为 0.8 和 0.2, C_j^R 取 1, k_3 取 500, 以 11 月份共 20 日数据生成典型负荷曲线为基准得到线路组合 2, 共 14 条线路。

两种方法下特 3 轮各线路与全网系统负荷曲线相似度如表 2 所示。采用平均负荷法进行轮次线路调整时仅考虑负荷大小, 其与全网负荷曲线平均相似度指标 r_{av} 分布较分散, 平均相似度为 0.6, 本文方法得到的平均相似度指标为 0.78, 说明在线路配置过程中, 由于目标函数加入诱导函数, 使 r_{av} 较大的线路优先加入, 并考虑目标最优, 因此组合 2 中线路与全网系统负荷平均相似度更高, 控制减载曲线跟随全网负荷曲线趋势能力更强。

表 2 两种方法下特 3 轮负荷线路组成

Table 2 Loads composition of special round three under the two methods

序号	平均负荷法		本文方法	
	线路组合 1	r_{av}	线路组合 2	r_{av}
1	10 kV 线路 a1	0.85	10 kV 线路 b1	0.7
2	10 kV 线路 a2	0.86	10 kV 线路 b2	0.79
3	10 kV 线路 a3	0.68	10 kV 线路 b3	0.83
4	10 kV 线路 a4	-0.14	10 kV 线路 b4	0.92
5	10 kV 线路 a5	0.78	10 kV 线路 b5	0.71
6	10 kV 线路 a6	0.09	10 kV 线路 b6	0.91
7	10 kV 线路 a7	0.83	10 kV 线路 b7	0.89
8	10 kV 线路 a8	-0.001	10 kV 线路 b8	0.8
9	10 kV 线路 a9	0.61	10 kV 线路 b9	0.83
10	10 kV 线路 a10	0.9	10 kV 线路 b10	0.85
11	10 kV 线路 a11	0.78	10 kV 线路 b11	0.93
12	10 kV 线路 a12	0.75	10 kV 线路 b12	0.91
13	10 kV 线路 a13	0.86	10 kV 线路 b13	0.44
14	10 kV 线路 a14	0.42	10 kV 线路 b14	0.41
15	10 kV 线路 a15	0.86	—	—

平均负荷法下所得特 3 轮线路平均波动率为 3.1%, 本文方法生成方法线路平均波动率为 1.58%, 由于在目标函数中考虑线路负荷曲线波动, 所得结果轮次线路组合整体波动率更小, 更有利于执行方案减载合格率的稳定及延续。

对典型曲线下两种方法进行校核, 控制执行减载量对比如图 3 所示。可见, 本文方法建立模型时同时考虑典型曲线 96 点进行约束, 因此最终生成组合线路按典型曲线累加所得实际轮次控制减载曲线与平均要求控制减载曲线接近, 96 时刻点均满足减载合格要求, 验证了所建数学模型的正确性。

平均负荷法由于只采用单一平均负荷为基准,

相当于式(12)中 n 只取 1 且不考虑诱导函数的情况, 即便在平均负荷下满足减载要求, 但由于平均负荷为 96 点负荷曲线取平均, 其难以充分描述各时刻点负荷情况, 因此在典型曲线下出现控制减载量超出上限与跌出下限情况, 难以在曲线维度达到各时刻点减载均合格要求。

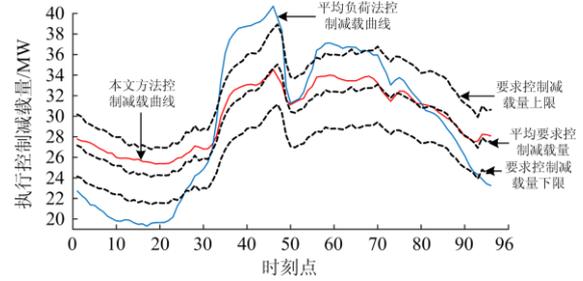


图 3 基准典型负荷曲线下控制减载对比

Fig. 3 Comparison of controlled load shedding under typical load curve

用 11 月 10 日至 30 日每日数据和 12 月 1 日至 30 日每日数据进行执行对比两种方法特 3 轮线路组每日 96 点减载执行合格率, 结果如图 4 所示。

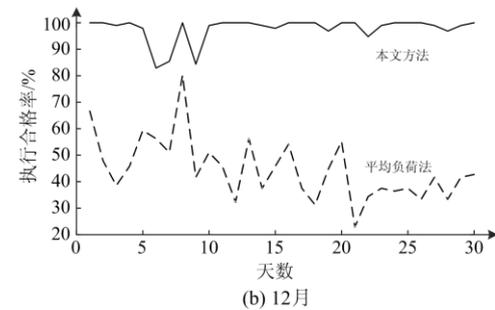
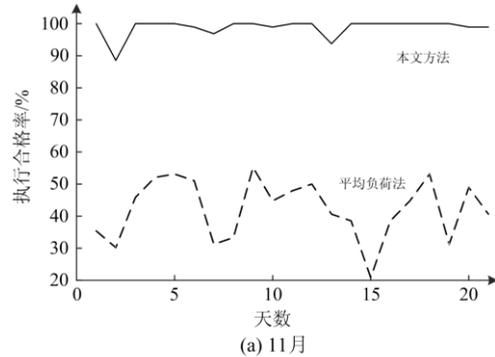


图 4 两种方法下执行合格率对比

Fig. 4 Comparison of qualified rate of execution under the two methods

相比于现采用单一平均负荷为基准的轮次线路调整方法, 本文方法以充分考虑长时域内各线路及全网系统 96 点典型负荷曲线为基准, 该基准能在实时层面较充分描述线路及全网系统的负荷曲线特

性,且充分考虑了线路相对全网负荷曲线相似性及曲线自身波动性,所得执行合格率更高且波动幅度更小,其在11月具有较高的合格率,验证了所建模型的准确性,同时该线路组合在12月执行时仍保持较高的合格率,说明了采用典型负荷曲线为基准且充分考虑线路负荷特性对于执行方案减载投入可靠性及稳定性提升的必要性。

两种方法下特3轮减载执行指标如表3所示。

本文方法11月平均执行合格率为98.8%,同时,用12月数据进行执行测试,得到平均执行合格率为95.5%,合格率得到很好延续,传统平均负荷法下平均执行合格率均不足50%,说明在实时曲线维度每日不足一半的时刻点执行减载达标。本文方法所得执行偏差率远小于平均负荷法,说明实际控制减载曲线与平均要求减载曲线接近,统计得到正负偏差时刻点数量相对均匀、正负偏差率较小且绝对幅值相近,证明了在曲线维度建立优化模型进行轮次线路组合调整的有效性。

表3 两种方法下特3轮执行指标对比

Table 3 Comparison of implementation indicators for special round three under two methods

减载执行指标	11月		12月	
	平均负荷法	本文方法	平均负荷法	本文方法
平均合格率/%	42.26	98.8	44.68	95.5
平均绝对偏差率/%	0.183	0.029	0.156	0.05
平均稳定度	2.35	0.77	2.15	0.89

本文方法所得执行稳定度优于平均负荷法,稳定度数值越小说明每日各时刻点最大、最小负荷控制率越接近,负荷控制率限制区间为 $[1, 1.25]$,当稳定度数值大于1时说明最大负荷控制率与最小负荷控制率差值大于0.25,即超出允许的偏差范围,每日同时出现控制减载量低于下限和超出上限时刻点,方案执行稳定性较差,本文方法所得执行平均稳定度值小于1,证明负荷控制率均在限制区间变化,各时刻点均保持控制减载量有效执行。

综上,传统方法进行减载执行方案线路组合调整难以达到实时维度下对控制减载合格率的较高要求,必须频繁且大幅调整执行方案并现场进行装置调整。本文方法所得结果可确保执行方案在具备高合格率的同时具有较好的应用时效,计算速度快,可适应不同时间维度调整需求。需要说明的是,由于配网线路检修以及采集数据异常情况难以避免,异常数据会影响时刻点减载量,但整体上本文方法可

在实时维度大幅提升减载方案落地执行的有效性。

4 评估决策系统应用

基于四川电网低频减载方案、执行方案评价指标及所提方法,研发低频减载现场执行方案评估决策系统。通过与调度生产技术支持系统实时数据交互,在电网安全三区部署,实现现场执行方案控制减载实时监控预警、多维评估、负荷特性分析及执行方案线路智能化编排与优化调整。现场方案控制切负荷实时监测界面如图5所示。

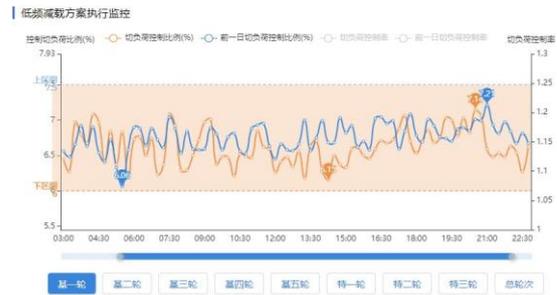


图5 现场方案控制切负荷实时监测

Fig. 5 Real time monitoring of load shedding control for the executed scheme

轮次线路调整如图6所示。

线路集合名称	线路参数	创建时间	操作
全线路集合	1315		线路集合评估 删除
线路集合一	607	2020-07-02	线路集合评估 删除
2020年线路池	607	2020-07-03	线路集合评估 删除

分析设置

请选择分析时间: 2020-11-01 - 2020-11-08

权重: 相似度: 80 % 稳定度: 20 %

放松程度: 不放松 放松

推荐方案自动生成

(a) 参数设置

生成方案详情

轮次	线路名称	所属变电站
基一轮	淮庐西路916负荷	淮湖站
基一轮	淮湖路915负荷	淮湖站
基一轮	淮天三路913负荷	淮湖站
基一轮	南蒙路912负荷	城南站
基一轮	向冀路908负荷	向阳站

(b) 结果生成(仅展示部分线路)

图6 方案轮次线路调整

Fig. 6 Load couple adjustment of each round for the scheme

该系统2020年在德阳电网投入生产应用以来,根据最新负荷数据,通过线路调整功能96点维度下各轮次控制减载合格率可提升至90%以上,并可快

速实现方案整定线路调整,有效提升了地调该项管理工作数字化、智能化水平,在省调度中心进行全网低频减载方案动态化调整下达时能在执行层面实现高效响应。

5 结论

低频减载是保证电力系统频率稳定的重要措施。针对我国交直流电网互联规模不断扩大、新能源渗透率持续提升的现状,在执行层面地市电网传统线路调整方式下执行方案合格率较低、执行时效性有限、需要现场频繁调整、难以具备对省级调度中心减载方案优化调整结果在配网落地实现的高效响应能力等不足,本文提出了考虑配网负荷曲线特性的轮次线路调整优化方法,结论如下:

1) 从控制减载合格率、偏差率以及稳定度三方面设计执行方案评价指标,并设计基于线路及全网系统典型负荷曲线的精细化轮次线路调整流程。

2) 基于轮次线路调整思路,以 96 点典型负荷曲线为基准建立轮次线路调整 0-1 整数规划模型,以控制减载相对平均要求减载量偏差最小并同时考虑线路负荷相对全网系统负荷曲线相似性较高、线路曲线波动性较小建立目标函数及控制偏差约束条件,并设计算法求解流程。

3) 测试结果及实践证明相对于传统采用单一负荷水平的平均负荷法,本文方法由于充分考虑长时域内不同线路及全网系统负荷典型曲线各时刻点负荷情况,同时充分考虑配网各线路负荷特性,建立同时满足典型曲线各时刻点减载要求的约束条件,因此生成线路组合在执行合格率、后续应用时效性及稳定性方面相比现有方法均大幅提升。

4) 基于执行方案评价指标设计及所提调整优化方法,研发低频减载评估决策生产应用系统,大大提升地市电网该项管理工作智能化水平。

本文方法可有效提升地市电网低频减载执行方案执行及管理水平,当负荷特性变化、线路检修及省调度中心减载方案动态化调整下达时,均能在实时维度动态实现响应,对于提升电网第三道保护防线可靠性意义重大。

参考文献

[1] 孙皓,王鲁杨,恽东军,等.基于改进的滑模频率偏移的孤岛检测方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):141-146.
SUN Hao, WANG Luyang, YUN Dongjun, et al. Improved slip mode frequency shift method based islanding detection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 141-146.

[2] 伍惠铖,王淳,尹发根,等.基于功率控制的含高渗透率户用光伏低压配电网电压控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):27-35.
WU Huicheng, WANG Chun, YIN Fagen, et al. Power control-based voltage control strategy of LV distribution network with high penetrations residential PVs[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 27-35.

[3] 时伯年,孙刚,瞿艳霞.柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):137-142.
SHI Bonian, SUN Gang, QU Yanxia. Research on coordinated frequency stability control after islanding based on VSC-HVDC technique[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 137-142.

[4] 王凡,李海峰,胥国毅,等.调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):1-8.
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 1-8.

[5] 陈璟,熊小伏,胡建,等.有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):19-29.
CHEN Jing, XIONG Xiaofu, HU Jian, et al. Thermal overload protection of transmission lines considering the influence of UFLS under active power imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 19-29.

[6] 李鹏飞,顾雪平,杨超,等.考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化[J].电力系统保护与控制,2018,46(18):156-163.
LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, et al. Optimization of low-frequency load shedding scheme considering the influence of power flow transferring on the power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 156-163.

[7] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Optimized coordinated control of LFC and SMES to enhance frequency stability of areal multi-source power system considering high renewable energy penetration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 407-421. DOI: 10.1186/s41601-018-0112-2.

[8] 李晔,张保会.动作延时对低频减载装置减载效果的影响[J].智能电网,2015,3(5):405-409.
LI Ye, ZHANG Baohui. Impact of the time delay on the effect of underfrequency load shedding[J]. Smart Grid, 2015, 3(5): 405-409.

[9] 陈璟,熊小伏,胡剑,等.有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):19-29.
CHEN Jing, XIONG Xiaofu, HU Jian, et al. Thermal overload protection of transmission lines considering the influence of UFLS under active power imbalance[J].

- Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 19-29.
- [10] 李常刚, 李华瑞, 刘玉田, 等. 计及低频减载动作的最大暂态频率偏移快速估计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 27-35.
- LI Changgang, LI Huarui, LIU Yutian, et al. Fast estimation of maximum transient frequency deviation considering under-frequency load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 27-35.
- [11] 李世春, 吕翔生, 钟浩, 等. 大规模双馈风电机组参与调频的电网自适应低频减载策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 109-115.
- LI Shichun, LÜ Xiangsheng, ZHONG Hao, et al. Adaptive under-frequency load shedding strategy of power grid with large-scale DFIG wind turbines participating in frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 109-115.
- [12] 蔡国伟, 孙正龙, 王雨薇, 等. 基于改进频率响应模型的低频减载方案优化[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3131-3136.
- CAI Guowei, SUN Zhenglong, WANG Yuwei, et al. Optimization of under frequency load shedding scheme based on improved system frequency response model[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3131-3136.
- [13] 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.
- [14] 吴云亮, 李晓璐, 唐晓骏, 等. 基于减载贡献因子的低频减载动态优化方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 105-109.
- WU Yunliang, LI Xiaojun, TANG Xiaojun, et al. Dynamic optimization of under-frequency load shedding strategy based on load shedding contribution factor[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 105-109.
- [15] 和敬涵, 柏丹丹, 王小君, 等. 低频减载综合代价最优优化算法[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3461-3466.
- HE Jinghan, BAI Dandan, WANG Xiaojun, et al. An optimal algorithm of comprehensive cost for under-frequency load-shedding[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3461-3466.
- [16] 钱敏慧, 居蓉蓉, 姜达军, 等. 基于自适应惯性权重混沌粒子群算法的多机系统低频减载整定算法[J]. 电气自动化, 2020, 42(2): 44-48.
- QIAN Minhui, JU Rongrong, JIANG Dajun, et al. Under-frequency load shedding for multi-computer systems based on adaptive inertia weight chaos particle swarm optimization[J]. Electrical Automation, 2020, 42(2): 44-48.
- [17] TOFIS Y, TIMOTHEOU S, KYRIAKIDES E. Minimal load shedding using the swing equation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2466-2467.
- [18] 李静波, 肖谭南, 童伟林, 等. 考虑负荷水平及有功备用的低频减载方案在线优化[J]. 电气自动化, 2019, 41(6): 32-35.
- LI Jingbo, XIAO Tannan, TONG Weilin, et al. Online optimization of the under frequency load shedding scheme considering load level and active power reserve[J]. Electrical Automation, 2019, 41(6): 32-35.
- [19] LAGHARI J A, MOKHLIS H, KARIMI M. A new under-frequency load shedding technique based on combination of fixed and random priority of loads for smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2507-2515.
- [20] 潘晓杰, 樊茂森, 张文朝, 等. 含水电系统的低频减载关键参数优化方法[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 76-82.
- PAN Xiaojie, FAN Maosen, ZHANG Wenchao, et al. Optimizing method for key parameters of under-frequency load shedding for power system penetrated with hydro-power[J]. Electric Power, 2020, 53(2): 76-82.
- [21] 张酌伟, 樊艳芳, 张锋, 等. 高风电渗透率下新疆电网低频减载方案研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 114-118.
- ZHANG Zhuowei, FAN Yanfang, ZHANG Feng, et al. Study on UFLS scheme of Xinjiang power grid under high wind power penetration[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 114-118.
- [22] 李顺, 廖清芬, 唐飞, 等. 高风电渗透率下的自适应低频减载策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1084-1090.
- LI Shun, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Adaptive underfrequency load shedding strategy considering high wind power penetration[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1084-1090.
- [23] YAN Jiongcheng, LI Changgang, LIU Yutian. Adaptive load shedding method based on power imbalance estimated by ANN[C] // Proceedings of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON), November 5-8, 2017, Penang, Malaysia: 2996-2999.
- [24] LI Changgang, WU Yue, SUN Yanli, et al. Continuous under-frequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 950-961.
- [25] 王开荣. 最优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
-
- 收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-05-08
- 作者简介:
- 高 剑(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 457399216@qq.com
- 朱 童(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhut10@163.com
- 罗 异(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: jiayouluoyi@163.com
- (编辑 葛艳娜)