

[控制系统]

基于遗传算法的母线负荷预测双向协调优化研究

文/广州供电局有限公司 陈明辉 王珂 蔡莹
北京清软创新科技股份有限公司 邵常宁

电力负荷多级预测是我国电网现行分级管理制度下的必然要求。母线的多级负荷预测为电网潮流计算、离线安全校核提供数据支撑，是保证电网安全经济运行的重要基础。针对母线多级负荷预测结果的偏差问题，基于遗传算法建立了双向协调优化机制，并提出两种方式进行协调量的优化调整，得到了可信度较高的协调预测结果。最后，通过实例分析了协调优化机制的实际效果，验证了该机制的有效性。

电力负荷预测是具有时空分布、层次量级和行政结构等多个维度的复杂体系。多级负荷预测是指对于同一预测量，电力负荷在不同的时间周期、基于不同行政级别，根据不同属性、不同结构等特征分别做出预测。因维度不同，预测结果会不可避免地出现偏差，需要通过各预测结果的协调使其达到一致，进而具备更高的可信度。在我国现行电网的分级管理制度下，通过上下级电网的负荷多级预测和协调校核，得到更可信的预测结果，是提高电力负荷预测准确性的重要手段。

多级预测在母线负荷预测中的应用有着更为重要的意义。母线负荷预测为电网潮流计算和离线安全校核提供数据基础，是实现电力系统节能发电调度、促进电网精细化管理的重要手段。与系统负荷相比，母线负荷基数较小，对外部变化敏感，多数母线通常混合多种行业负荷，在不同条件下的单一维度的预测可信度通常不高，需要借助多级协调来获得更为准确的预测结果。母线负荷的多级协调预测需求主要体现在具有直接关联性的相邻电压等级的母线上，即高压站出线端母线的总需求预测及其直接关联的多条中压站出线端母线子需求预测结果之和的双向协调。

关于负荷协调预测的协调方法，国内外学者已经有了较多的研究。相关文献基于量化可信度概念提出了协调的基本模型，将其建模为典型的数学约束优化，采用拉格朗日乘数法求得了协调量。本文将在此约束模型基础上，针对关联母线的多级协调这一具体应用场合，提出两个双向协调优化模型，利用遗传算法优秀的寻优特性优化协调量，并通过算例分析了协调优化效果。

母线负荷双向协调模型

针对存在物理关联关系的不同电压等级母线，提出母线负荷预测协调优化模型如下。

设高压站出线端母线的实际负荷为 P_0 （总负荷），与其存在关联关系的 n 个中压站端母线的实际负荷为 $P_1, P_2, \dots, P_n$ （子负荷），则根据电网物理特性，总负荷等于子负荷之和加网损量，即

$$P_0 = \sum_{i=1}^n P_i + \Delta r \quad (1)$$

式中， Δr 为网络损耗。

由于预测误差的存在，式（1）一般无法成立。设总负荷与子负荷预测结果不平衡量为 $\Delta \hat{P}$ ，则

$$\hat{P}_0 = \sum_{i=1}^n P_i + \Delta r + \Delta \hat{P} \quad (2)$$

式中, $\hat{P}_0$ 和 P_i 分别代表总负荷和子负荷预测值, Δr 为网络损耗。

协调优化的目标即尽量减小预测结果不平衡量 $\Delta \hat{P}$ 。因此,双向协调的优化目标可表述为经过协调优化后的总负荷与各子负荷之和的不平衡量 $\Delta \hat{P}$ 最小,目标函数定义为

$$\min f = [k_0 P_0 - (\Delta r + \sum_{i=1}^n k_i P_i)]^2 \quad (3)$$

式中, k_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) 为总负荷、每个子负荷的协调系数。协调优化本质上就是通过对原预测值进行合理的伸缩变换实现的,协调系数即变换的比例系数。

上述模型可表征双向协调优化的基本原理。对于具体的日负荷预测,协调优化可采取整体协调和逐点协调两种方式。

1. 整体协调优化模型

整体协调方式下,协调系数仅与母线有关,同一母线在一天中任何时刻的协调系数不变。整体协调优化的目标函数由式(3)变换为

$$\min f = \sum_{i=1}^m [k_0 P_{0,t} - (\Delta r_t + \sum_{i=1}^n k_i P_{i,t})]^2 \quad (4)$$

式中, m 为时刻点总数; $t = (1, 2, \dots, m)$ 为时刻点; $P_{i,t}$ 为第 i 个子(总)负荷在 t 时刻的预测值; Δr_t 为 t 时刻的网损,可由历史统计的平均值得到。

整体协调优化是一种粗放式的协调,对某一条母线负荷的协调系数是固定的。

2. 逐点协调优化模型

逐点协调方式下,协调系数不仅与母线有关,还与时刻有关。逐点协调优化的目标函数可由式(3)变换为

$$\min f = \sum_{i=1}^m [k_{0,t} P_{0,t} - (\Delta r_t + \sum_{i=1}^n k_{i,t} P_{i,t})]^2 \quad (5)$$

式中, $k_{i,t}$ 为第 i 个子(总)负荷在 t 时刻的协调系数。

逐点协调优化是一种精细化的协调,各条母线负荷各时刻点的协调系数均不相同。

遗传算法简介

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是目前较多应用于人工智能领域中解决最优化问题的一种搜索启发式算法,最早由美国密歇根大学教授J.Holland于1975年提出。GA通过模拟达尔文进化论的自然选择和遗传学机理的生物进行规律,采用概率化的寻优方法自动调整搜索方向,并具

有可大规模并行计算和全局寻优能力的优点,已被广泛应用于组合优化、机器学习、信号处理和自适应控制等领域,是现代智能计算中的关键技术。GA基本算法流程如图1所示。

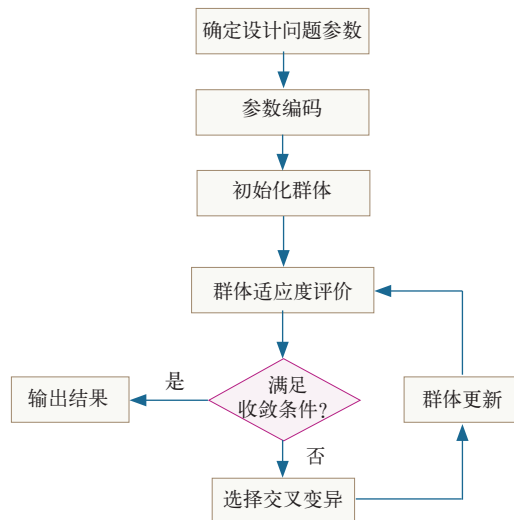


图1 GA基本算法流程

结合本文逐点协调的优化目标来说明GA算法的基本流程如下。

1) 确定问题参数,即待优化变量——协调系数,对待优化变量进行参数编码,确定适当的初始种群。

2) 确定GA的适应度评价函数,本例中即目标函数式(5)。

3) 判断适应度是否满足收敛条件,满足则表明优化结束,输出结果;不满足则进行步骤4。

4) 进行选择、交叉、变异等遗传操作,更新子代群体,继续步骤3的操作。

对于 n 个优化变量,遗传算法的实质是在 n 维空间中寻找满足目标函数的最优解。研究表明,遗传算法对初值的选取具有较高的敏感性,并且随着变量个数的增加,次优解的个数将呈几何级数增长;而遗传算法的收敛条件是根据梯度来确定,因此极易陷入局部最优解。前文述及的两种协调优化方式中,整体协调优化虽然处理较为笼统,但可根据各母线负荷的电量情况确定合理的协调系数迭代初值,再利用遗传算法寻求满足目标函数的最优解,能够较好地得到全局最优解;而逐点协调优化虽然进行了精细化的协调,但因优化变量较多,协调系数迭代初值在全体解空间内随机给出,可能存在过拟合和陷入局部最优的问题。上述两种协调方式的协调效果将通过下文

实际算例验证和对比。

算例分析

在进行算例分析之前，首先做两点必要的说明，即GA参数和负荷预测准确率评价标准。

算例采用的GA基本参数如表1所示。

表1 GA参数说明	
编码方式	0—1符号串
初始种群规模	100
最优种群个数	10
进化代数	60
变异概率	0.05
交叉概率	0.05

算例中负荷预测准确率采用基于均方根误差(RMSE)方法计算，有

$$\text{准确率} = 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{\hat{i}}}{P_0} \right)^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中，N为总采样点数； P_i 为实际负荷； $P_{\hat{i}}$ 为预测负荷， P_0 为母线容量。

以某大区电网辖区内某220 kV主变高压侧母线（容量305 MW，总负荷）及其直接关联3个110 kV主变低压侧母线（容量114 MW，子负荷1#，2#，3#）为算例，进行双向协调优化的研究。2015年11月1日未经协调之前总实际负荷与总预测负荷曲线如图2所示（负荷均已归一化处理，下同）。

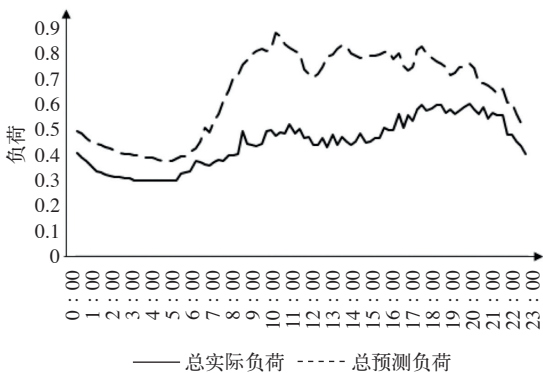


图2 总实际负荷与总预测负荷曲线

由图2可见，未经协调之前的总负荷预测误差较大，个别时段相对误差甚至超过80%。根据式(6)可统计出总负荷及其关联的子负荷1#、2#、3#的准确率分别为95.1%、92.7%、95.4%、96.3%。

由历史实际负荷统计得到网损量 $\Delta r_i = 1$ MW， $t=1, 2, \dots, N$ ，即网损量在所有采样时刻均为1 MW。

分别按照上文描述的两种方式进行协调优化。

(1) 整体协调

整体协调需要先根据历史电量计算出协调系数的初值。表2给出了协调系数初值的计算中间值。

表2 协调系数计算中间量			
母线名称	历史日平均电量 /MW·h	预测日积分电量 /MW·h	协调系数初值
总负荷	815.0	1014.5	0.80
子负荷1#	225.8	274.7	0.82
子负荷2#	307.3	354.3	0.87
子负荷3#	257.8	247.1	1.04

注：协调系数初值 = 历史日平均日电量/预测日积分电量。

取适应度函数为式(4)进行GA优化。整体协调优化后的协调系数如表3所示。

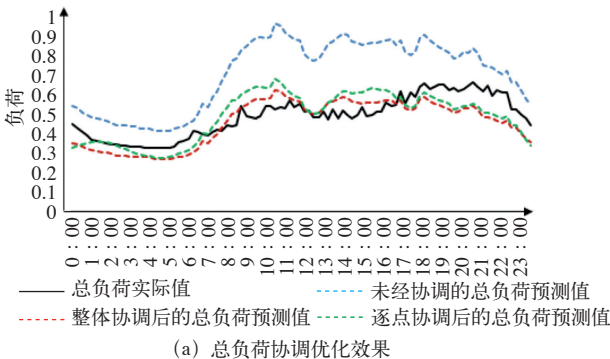
表3 整体协调系数优化结果	
母线名称	整体协调系数
总负荷	0.64
子负荷1#	0.66
子负荷2#	0.76
子负荷3#	1.12

(2) 逐点协调

逐点协调每条母线逐点的协调系数均不相同，宜采用无约束优化办法由GA在全体解空间里搜寻最优解。为了保持曲线的连贯性需对协调结果进行平滑处理。逐点协调结果将产生一组协调系数阵列，由于篇幅所限，仅将0:00、6:00、12:00和18:00四个时刻以及平均协调系数列于表4中。

表4 逐点协调系数优化结果					
母线名称	逐点协调系数				平均系数
	0:00	6:00	12:00	18:00	
总负荷	0.59	0.70	0.65	0.66	0.69
子负荷1#	0.80	0.78	0.77	0.82	0.76
子负荷2#	0.94	0.77	0.78	0.77	0.79
子负荷3#	0.55	0.72	0.72	0.76	1.13

对比表3、表4可知，整体协调系数与逐点协调系数平均值相似，表明两种协调方式整体上对预测曲线的伸缩调整的方向和幅度是接近的。经过上述两种协调系数优化的总负荷与子负荷双向协调优化效果如图3所示。



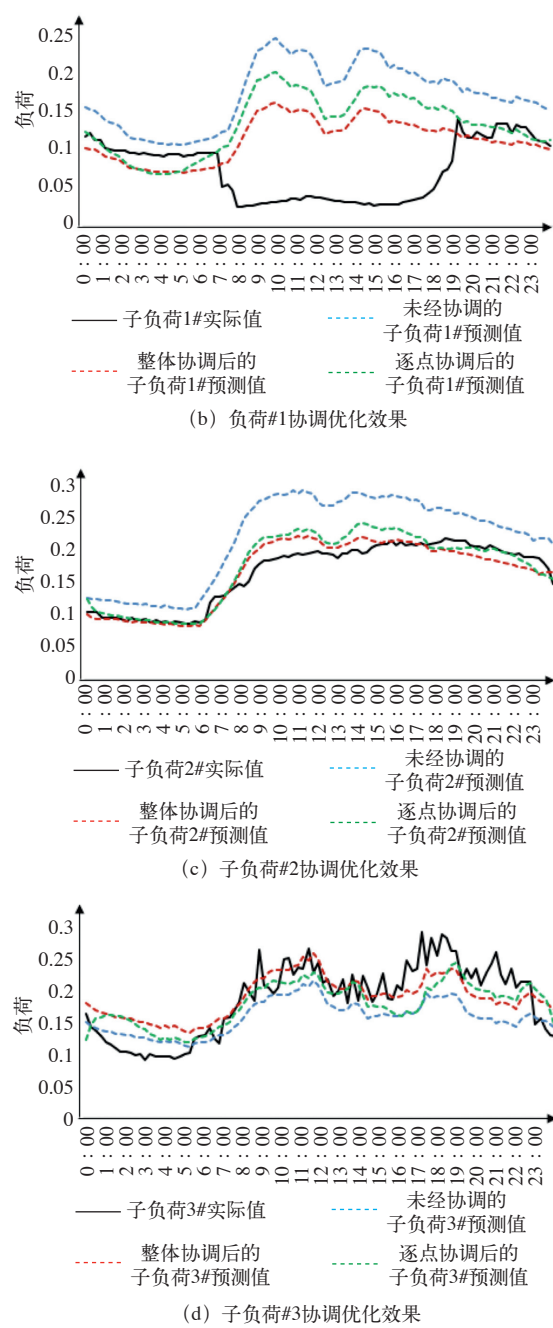


图3 总负荷与子负荷系协调优化效果

由图3可见，经过协调优化后，母线负荷预测曲线明显更加接近实际值，两种协调方式均取得了较好的协调效果。4条母线负荷预测在用两种协调方式下的准确率如表5所示。

表5 协调前后准确率对比

母线名称	负荷预测准确率		
	未协调	整体协调	逐点协调
总负荷	95.12%	98.52%	98.30%
子负荷#1	92.70%	95.85%	94.53%
子负荷#2	95.41%	99.12%	98.78%
子负荷#3	96.33%	97.90%	97.14%

由表5可见，总负荷和子负荷经过协调优化后的预测准确率均有较大幅度提高，并且整体协调的效果略优于逐点协调。

为了测试算法的适应性，另取其他3个220 kV 3个主变（编号为#1，#2，#3）及其对应的若干110 kV母线进行测算，测试时间为2015年11月1日—2015年11月31日。以11月1日#1主变为例，协调前后的预测效果如图4所示。

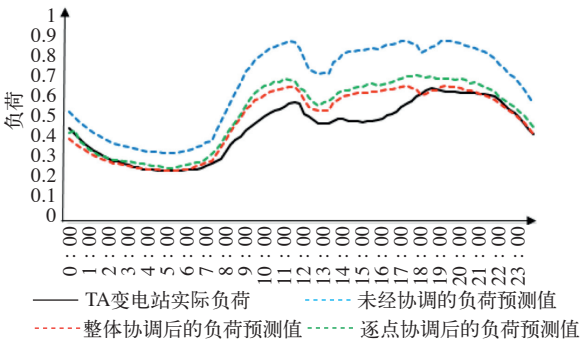


图4 #1主变协调优化效果

统计一个月内三组数据协调前后的平均负荷准确率，如表6所示。

表6 协调前后准确率对比

主变编号	负荷预测准确率		
	未协调	整体协调	逐点协调
#1	89.54%	94.39%	92.51%
#2	93.64%	96.37%	94.41%
#3	95.41%	98.43%	95.98%
加权平均	92.94%	95.69%	93.88%

由表6可见，经过协调优化后，3个220 kV站母线负荷预测平均准确率分别提高了4.8%、2.7%和3.0%。根据预测积分电量的加权平均结果，整体协调后平均准确率相比未协调前提高约2.8%，逐点协调后提高约0.9%，证明了整体协调是更占优势的母线双向协调优化方式。

结束语

应当指出，本文的研究成果仅仅是针对于母线双向优化这一具体场合展开的，关于两种协调方式的优劣性结论并没有得到大量场合的应用支持，需要更多实际的测算才可能得到适用的结论。但本文所提研究思路具有很好的借鉴作用，可以进一步深化推广至系统负荷的多级预测，包括上下级电网负荷的协调，甚至多级电网的多维协同协调，等等，来最大程度地提高系统负荷的预测准确率。这些内容有待于后续的进一步深入研究。EA

基金项目：广州供电局有限公司技改项目（080016GS61150002）

（收稿日期：2016.06.10）

（编辑：杨得润）