

DOI: 10.7667/PSPC161686

基于多时段 IL 用户优化调度的配电网 TSC 均衡提升策略

周佳林, 刘艳

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 可中断负荷的管理作为配电网的一种调度手段, 研究其对配电网供电能力的影响具有重要意义。目前研究仅涉及在加入用户分级后配电网的供电能力是否有所提升以及能够提升多少, 尚不能有效地管理利用负荷以及实现可中断负荷在提升供电能力方面的电力资源的有效分配。以单位时段配电网供电能力值为优化变量, 以计及可中断负荷后配电网 TSC 的曲线形状与日负荷曲线形状相似度最高和配电网各时段的供电能力最大为优化目标, 建立可中断用户调度优化模型。针对模型采用遗传算法求得 Pareto 最优解集, 并采用基于 DM 层次分析法进行决策, 选出最满意的调度方案。通过算例验证了所提模型和算法的有效性。

关键词: 配电网; 供电能力; 可中断负荷; 优化调度; 遗传算法

A balanced improving scheme for distribution network TSC based on multi-period IL user optimal scheduling

ZHOU Jialin, LIU Yan

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: The management of interruptible load is a kind of dispatching method of distribution network. It is important to study its influence on power supply capacity of distribution network. The current research only involves the improvement of power supply capability of the distribution network after the user is added into the classification. It can not effectively manage and use the load, and can not realize the effective distribution of interruptible load on improving the supply capability of distribution network. An optimized model of interruptible user scheduling is established in this paper. In the model, the value of power supply capability of distribution network in unit period is used as optimization variable, the highest similarity of the curve shape between TSC considering interruptible load and the daily load of the distribution network and the maximum power supply capability of distribution network at different time periods are taken as optimization objectives. The genetic algorithm is used to obtain the Pareto optimal solution set, and decision-making based on DM-level analytic method is adopted to select the most satisfactory scheduling scheme. A numerical example is provided to verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607068).

Key words: distribution network; power supply capability; interruptible load; optimal scheduling; genetic algorithm

0 引言

随着智能电网研究和建设的不断深入, 供电能力已经成为配电网规划建设领域的一个新指标, 对提高电网资产利用效率具有重要意义。

目前在供电能力的研究成果方面已涉及建立其指标体系^[1-2]、建模^[3-4]、计算^[4]和应用^[5-6]等。其中, 供电能力的计算主要采用容载比法^[7]、最大最小负

荷倍数法^[8]和网络最大电流法^[9]等。文献[10]首先提出了基于变电站主变互联的供电能力计算方法。文献[11]提出了计及主变过载和联络容量约束的配电系统供电能力计算方法。文献[12]提出了一种高维多目标电力系统无功优化模型, 能够在不恶化有关损耗和电压水平等目标的情况下, 提升供电能力。文献[13]针对配电网供电瓶颈以及未考虑多电压等级协同供电不足的问题, 构建了配电网供电能力计算模型。

配电网中用户对系统可靠性的不同需求使可中断负荷成为配电网的一种重要资源, 在维持电力系

基金项目: 国家自然科学基金(51607068)“面向售电侧开放的主动配电网供电能力多时间尺度建模及优化决策研究”

统安全可靠运行和缓解电力市场价格等方面起了重要作用, 并已得到广泛应用^[14]。可中断负荷(Interruptible Load, IL)作为一种虚拟的备用发电容量资源和输电容量资源, 在调峰和降低阻塞等方面受到越来越多的关注。文献[15-17]研究了利用可中断负荷代替一部分备用容量, 可中断负荷作为备用容量能够与大电网供电互补、协调, 从而为用户提供可靠和优质的电能。文献[18]构建了 IL 参与高峰时段市场备用的选择评估模型和电网企业效益测算模型。文献[19]提出了计及用户分级与互动的供电能力模型, 分析了三级用户在突发状况下参与互动并削减负荷对配电网最大供电能力(Total Supply Capability, TSC)的影响。

文献[20]考虑中断补偿费用最小化和中断频率最小化等多个目标, 建立了多个用户的多时段多目标可中断负荷优化调度模型。文献[21]采用需求侧报价的方式将互动负荷纳入日前调度计划, 精确考虑了互动负荷的响应成本和响应持续时间等影响。

供电公司与用户签订 IL 协议考虑了不同用户的负荷中断特性, 如每次中断的最大持续时间、两次中断之间的最小时间间隔和调用周期内的总中断时间等, 因此, 为了使可中断负荷更好地发挥提升供电能力的潜力, 本文充分考虑不同类型用户参与响应的特性, 针对配电网供电能力均衡提升的问题, 以单位时段配电网供电能力值为优化变量, 以计及可中断负荷后配电网各时段的供电能力最大和配电网 TSC 的曲线形状与日负荷曲线形状相似度最高为优化目标, 建立可中断用户调度优化模型, 得到多时段下能够均衡提升配电网供电能力的 IL 用户的优化调度方案。

1 可中断负荷对 TSC 的影响

1.1 可中断负荷概述

可中断负荷是指对供电可靠性的要求不高、在特定时段允许小概率停电事故, 并受到一定补偿的特殊负荷^[22]。目前用户级别依据不同用户对用电可靠性的不同需求来划分^[23]。由于三级负荷易于安排停电计划, 供电公司在与用户签订可中断负荷合同时, 重点考虑的是三级负荷。此外, 只有负荷切除时间和停电持续时间满足一定要求的用户才可以作为可中断负荷签订 IL 合同, 这些用户可以根据自己用电的实际情况选择签订不同的 IL 合同。

从 IL 用户角度来看, 用户可以通过衡量响应收益、惩罚以及成本等因素确定能否从响应中获得利益, 从而做出对自己有利的响应决策。可中断负荷的实施充分考虑了用户的主动性, 促进用户主动参

与电力系统的调度过程, 从而消除或者缓解负荷高峰时期的供电不足情况。

1.2 可中断负荷对 TSC 的影响

最大供电能力是指一定供电区域内配电网在满足 $N-1$ 安全准则条件下, 同时计及变电站主变与配电网转供能力以及考虑到实际运行约束的最大负荷供应能力^[1]。

$N-1$ 准则是配电网系统规划和运行中的重要准则, 要求配电网在运行时, 当配电网中的某个独立元件发生故障, 电网中不会出现不应该的用户停电并保持稳定运行^[3]。

配电网正常运行时, IL 用户在负荷高峰期响应中断用电以保证系统满足 $N-1$ 校验, 这种情况是为了满足系统本身运行安全, 而配电网实际承载的负荷量并未增加, 因此正常运行时可中断负荷对 TSC 的大小没有影响。当系统发生 $N-1$ 故障时, 在负荷较高的情况下, 中断对 IL 用户的供电, 使联络线上转带的负荷量减少, 从而减小联络线对提升供电能力的约束, 使配电网满足主变及馈线的 $N-1$ 校验, 此时可中断负荷才能够影响配电网 TSC 的大小。

2 多时段可中断负荷优化调度模型

在含有可中断负荷的配电网中, 可中断负荷对配电网供电能力的影响在于系统处于用电高峰时段运行时, 可中断负荷能够响应电网需求中断用电, 从而减小配电网在转带负荷时的压力, 使其满足 $N-1$ 校验的约束条件。而系统实际运行时在一天当中可能出现两个甚至多个用电高峰时段, 当用电高峰期发生 $N-1$ 故障时, 供电公司向 IL 用户发出中断信号, 用户响应并减少用电, 从而使配电网满足 $N-1$ 校验。为了避免 IL 用户在参与调度时集中到某一时段, 需要对 IL 用户的调度进行优化, 以保证在 IL 用户参与调度后各高峰时段提升的供电能力较为均衡, 同时使各时段的供电能力得到最大限度的提升。

2.1 IL 用户调度优化模型

在含有可中断负荷的配电网中, 考虑到用户签订的 IL 协议的内容, 可中断用户是否响应负荷中断、用户何时响应负荷中断以及响应能够持续多长时间等问题都会对配电网在一天当中各时段的供电能力产生不同影响。

由于 IL 用户在参与调度时有中断持续时间的限制, 当用户参与调度的时间集中在某一用电高峰时段时, 则有可能导致其他用电高峰时段可参与调度的 IL 用户的减少, 从而影响其他高峰时段供电能力的提升。如图 1 所示, FL 曲线为典型日负荷曲线。TSC1 曲线和 TSC2 曲线分别表示两种不同的 IL 用

户调度方式下的配电网供电能力曲线。曲线 TSC1 所示情况下, 有较多的 IL 用户在第一个负荷高峰时段响应调度, 中断负荷导致相应时段内 TSC 提升幅度较大。相比之下, 在其他负荷高峰时段由于可参与调度的用户减少使得 TSC 提升得很小。此时, 如果发生 $N-1$ 故障, 为了保证各馈线和主变以及负荷节点满足 $N-1$ 约束条件, 则将导致电网直接失去部分未签订协议的负荷。而在第一个负荷高峰时段, 由于供电能力提升裕度较大, 可以满足甚至远远超出了发生 $N-1$ 故障时的供电需求。这说明对 IL 用户的调度策略不合理将导致供电能力增长不平衡的出现。因此, 为了更加合理充分地发挥 IL 用户的作用, 本文提出配电网供电能力均衡提升策略, 即: 在跟踪高峰负荷需求的基础上, 最大限度提升各负荷高峰时段的配电网供电能力, 如曲线 TSC2 所示。

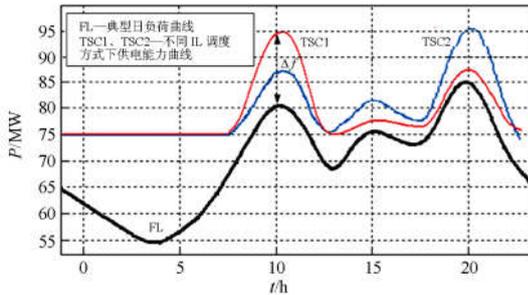


图 1 IL 参与下配电网 TSC 曲线和日负荷曲线

Fig. 1 Distribution network TSC curve and daily load curve based on IL participation

配电网 TSC 跟踪高峰负荷需求的能力可以由各时段配电网 TSC 与负荷水平的差值 Δf 的离散度来表示。离散度越小, 表明差值 Δf 之间的差异程度越小, TSC 的增长较为均衡, 即 TSC 曲线和负荷曲线的相似度越高, 认为这种情况下的 IL 调度方案是较为合理的。

标准差是最常用的反映变量离散度的指标, 因此, 本文以配电网 TSC 与负荷水平差值的标准差大小来衡量离散度。将负荷高峰时段内 TSC 的曲线与日负荷曲线相似度最高作为调度 IL 用户的优化目标, 通过以下量化表达式对 IL 用户的调度进行优化, 以平衡多时段供电能力的提升。

$$\min \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T ((TSC_i - f_i) - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T (TSC_j - f_j))^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: T 表示一天内负荷高峰期总的持续时间, 单位时段为 1 h; TSC_i 表示可中断负荷参与下 i 时段的最大供电能力; f_i 表示相应时段的负荷量。

目标 1 求解得到的最大供电能力曲线方案并不

能保证供电能力得到最大限度的提升。其原因是 IL 用户的参与有多种情况, 可能当只有部分 IL 用户参与调度时, TSC 曲线与日负荷曲线的相似度最高, 而此时还有部分 IL 用户没有参与调度, 导致 TSC 并未得到充分的提升。因此为了保证各时段配电网的供电能力最大限度地提升还需要建立目标函数:

$$\max(\min((TSC_1 - f_1), \dots, (TSC_T - f_T))) \quad (2)$$

式(2)表示使供电能力达到最大值的负荷调度方案, 当高峰期内配电网各时段的供电能力值与负荷值差值的最小值达到最大时, 配电网的供电能力得到最大限度的提升。

2.2 含可中断负荷的配电网最大供电能力模型

如前所述, 对 IL 优化调度的目标是以负荷高峰需求为引导, 均衡地提升配电网最大供电能力。其中, 考虑有 IL 参与的配电网最大供电能力的求解是评价 IL 优化调度效果的基础。

已有研究在求解配电网最大供电能力的过程中, 主要考虑网络实际运行情况下最大负荷供电能力, 同时还要满足 $N-1$ 安全约束。为了反映 IL 用户响应中断后对馈线负荷量的影响以及方便建立含有可中断负荷的配电网供电能力模型, 定义减负荷因子 α : 在系统发生故障时, 参与调度的用户削减或中断负荷, 使负荷降低, 其值与原负荷的比值为 α ($0 < \alpha \leq 1$), 且在负荷增长过程中 α 不变^[12]。供电能力模型以最大供电能力为目标函数, 以 $N-1$ 安全校验作为约束条件, 包括主变容量约束、馈线容量约束、联络线容量约束以及节点电压约束。

对于包含多个互联变电站的配电网, 满足 $N-1$ 校验的最大供电能力目标函数为

$$\max TSC = \sum TP_i \quad (3)$$

式中, TP_i 为最大供电能力时主变 i 所带负荷。

$$\text{s.t. } TP_i = \sum_{F_m \in TP_i} F_m \quad (4)$$

$$F_m = \sum_{h \in m} L_h \quad (5)$$

$$trf_{mn} + F'_n \leq R_{Fn} \quad (6)$$

$$trf_{mn} = \sum_{h \in m} \alpha_h L_h \quad (7)$$

$$F'_n = \sum_{h \in n} \alpha_h L_h \quad (8)$$

$$\alpha_h = \begin{cases} \alpha & t \leq y \leq t + D \\ 1 & \end{cases} \quad (9)$$

$$trt_{ij} = \sum_{F_m \in TP_i, F_n \in TP_j} trf_{mn} \quad (10)$$

$$trt_{ij} + \sum_{n \in j} F'_n \leq R_j \quad (11)$$

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \quad (12)$$

式中： t 为用户中断时刻； D 为用户中断负荷持续时间； F_m 为系统正常运行时馈线 m 所带负荷； F'_n 为系统发生故障用户削减负荷后馈线 n 上的负荷量； trf_{mn} 为馈线 m 进行 $N-1$ 校验时转带给馈线 n 的负荷量； L_h 表示系统正常运行时节点用户的负荷量； R_{Fn} 为馈线 n 的容量； $\alpha_h = \alpha$ 表示节点用户在 D 时间段内持续响应中断负荷； $\alpha_h = 1$ 表示在其他时间段不参与负荷中断调度； trt_{ij} 为主变 i 进行 $N-1$ 校验时转带给主变 j 的负荷量； R_j 为主变的额定容量； U_{\max} 、 U_{\min} 分别为节点电压上下限。

3 IL 用户调度模型的优化

3.1 调度优化算法

本文建立的是一个基于配电网供电能力的 IL 用户调度多目标优化模型，模型最优解的求取通过遗传算法得到，遗传算法是解决最佳化的搜索算法，以生物进化为原型，具有收敛性好、计算时间少的优点。遗传算法是把问题参数编码为染色体，再利用迭代的方式进行选择、交叉及变异等获得染色体信息，最终得到符合优化目标的染色体即最优解。假设配电网含有 M 个签订协议的 IL 用户， M_i 表示 IL 用户节点编号 ($i=1, 2, \dots, M$)； T 为一天内总的高峰时间，以小时为单位； A_j 表示第 j 个高峰时段的时刻 ($j=1, 2, \dots, T$)。遗传优化算法流程如下。

步骤 1：随机产生的初始解为 $1 \times M$ 的数列，表示用户 M_i 中断负荷的时间 A_j 。将解表示成 $T \times M$ 的 0、1 矩阵， (i, j) 位置为 1 表示 M_i 用户在 A_j 时刻参与调度。

步骤 2：将矩阵中每个单位时段用户参与情况形成的矩阵组作为 1 个个体，则初始群体有 T 个个体。分别求出 T 个高峰时段的配电网 TSC 值。

步骤 3：将步骤 2 求得的 T 个时段的 TSC 值代入上文多目标优化调度模型中，将计算得到的两个目标函数值作为个体适应度值，通过选择、交叉和变异交换种群中染色体的信息，当满足设置的遗传代数后，算法结束，得到 Pareto 最优解集。

步骤 4：利用基于 DM 层次分析法^[24]进行权重的选取，对确定的 Pareto 解集进行决策，从而得到最满意解。

3.2 基于配电网最大供电能力的 IL 用户调度优化流程图

如图 2 所示。

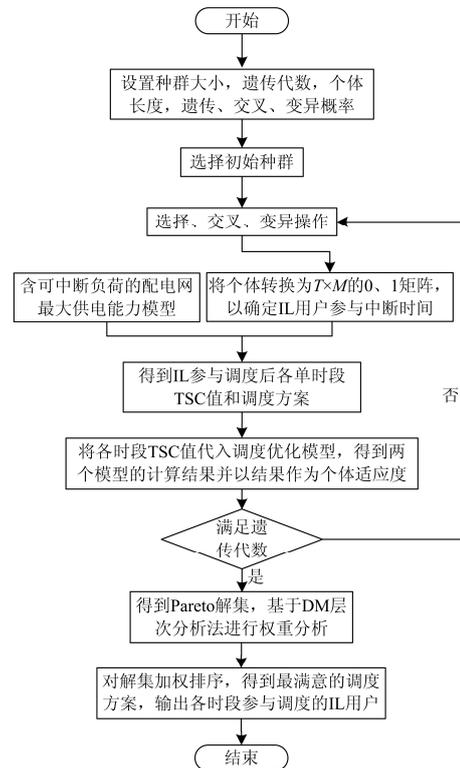


图 2 多目标调度优化流程图

Fig. 2 Flowchart of multi-objective scheduling optimization

4 算例分析

本文以某地区 10 kV 配电网为算例，电网含有 4 座 110 kV 变电站、8 台主变、46 回 10 kV 馈线和 74 个用户负荷节点，其中 4 台主变容量为 40 MVA，另 4 台主变容量为 63 MVA。线路阻抗为 $(0.163+j0.365) \Omega/\text{km}$ ，相邻节点间的线路长度均为 4.65 km。电压约束为 0.9~1.1 p.u.，线路额定载流量为 12.6 MVA。系统结构如图 3 所示。

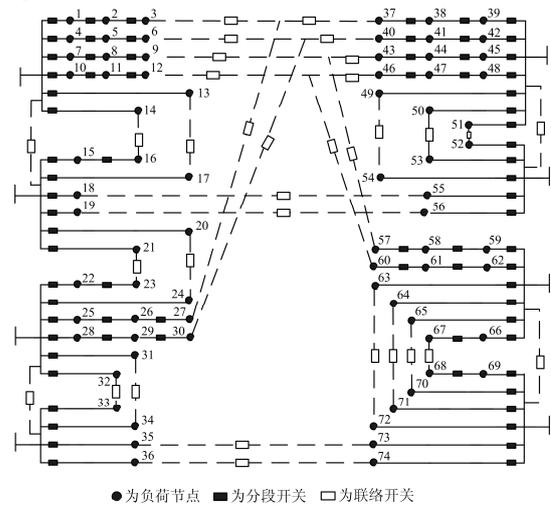


图 3 算例配电网结构简化图

Fig. 3 Simplified distribution network structure

一、二级用户为重要用户, 不可签订 IL 协议, 三级用户可签订协议但只有部分用户签订了 IL 协议。当地用户分级以及参与 IL 的情况如表 1 所示。

表 1 用户分级及用户参与 IL 的情况

Table 1 User's classification and the situation of user participating IL

节点个数	节点编号	用户分级	IL 签订情况
15	1,8,14,19,23,29,34,38,44,50,55,60,63,67,72	一级用户	不可签
20	2,6,10,13,16,20,24,27,30,32,35,41,47,49,53,56,58,62,68,74	二级用户	不可签
14	4,7,12,17,21,25,28,36,40,46,52,65,70,73	三级用户	可签但未签
25	3,5,9,11,15,18,22,26,31,33,37,39,42,43,45,48,51,54,57,59,61,64,66,69,71	三级用户	签订 IL

根据文献[19]负荷响应模型, 按照给定的常系数分别为 750、1500, 某时段的电价为 750 元/MWh, 电费折扣为 0.85, 中断补偿为 300 元/MWh, 单位差额响应电量所受到的惩罚为 50 元/MWh, 考虑 25 个可中断用户在 13 个小时时段(9:00—21:00)中的可中断负荷调度问题, 计算得到每个时段要求的负荷中断量以及中断持续时间如表 2 所示。

每次用户中断的持续时间按照协议的最大持续时间。从用户的角度考虑, 调度周期内中断次数越小越好, 两次中断的最小时间间隔为 24 h。采用遗传算法进行求解, 种群数为 100, 迭代次数为 1000, 交叉率为 0.7, 变异率为 0.01。图 4 显示了 IL 用户调度方案中满足约束集的 Pareto 解空间。

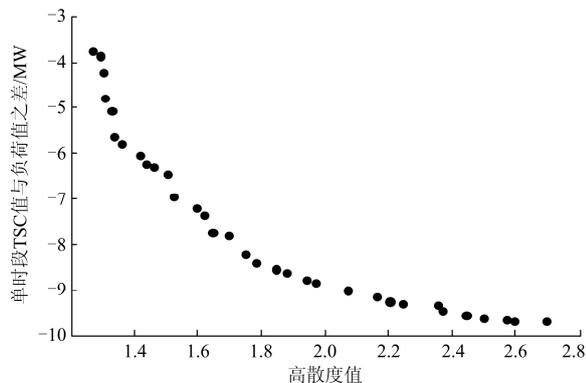


图 4 Pareto 最优解集分布

Fig. 4 Distribution of Pareto optimal solution set

表 2 可中断用户特性

Table 2 Interruptible user features

节点编号	负荷/MW	协议削减比例	供电方要求削减比例	用户意愿	实际削减量/MW	减负荷因子 α	最大中断时间/h
3	0.29	25	22.1	0.5	0.0641	0.7790	2
5	0.37	34	27.7	0.6	0.1025	0.7230	3
9	0.45	12	9.9	0.65	0.0540	0.8800	3
11	0.3	21	17.5	0.7	0.0630	0.7900	4
15	0.35	23	21.1	0.55	0.0739	0.7889	2
18	0.4	25	23.2	0.4	0.0928	0.7680	3
22	0.4	30	20.3	0.45	0.0812	0.7970	4
26	0.5	31	21	0.4	0.1050	0.7900	3
31	0.37	34	32.1	0.5	0.1188	0.6789	3
33	0.3	36	27.6	0.65	0.1080	0.6400	2
37	0.45	40	22.2	0.45	0.0999	0.5780	4
39	0.45	21	17.8	0.3	0.0801	0.8220	2
42	0.37	33	30.7	0.45	0.1136	0.6930	3
43	0.29	21	19.1	0.5	0.0554	0.8090	2
45	0.45	19	15.1	0.55	0.0680	0.8489	2
48	0.35	25	20.9	0.35	0.0732	0.7909	3
51	0.35	27	20.4	0.65	0.0945	0.7300	2
54	0.45	25	18	0.5	0.0810	0.8200	4
57	0.75	31	20	0.45	0.1501	0.7999	4
59	0.44	20	11.8	0.6	0.088	0.8000	3
61	0.42	30	14.6	0.7	0.1260	0.7000	2
64	0.36	34	30.2	0.65	0.1224	0.6600	4
66	0.45	32	25	0.6	0.1125	0.7500	3
69	0.43	41	33	0.7	0.1762	0.5902	2
71	0.32	32	10	0.55	0.0500	0.8438	3

基于 DM 层次分析法得到评估权重向量为 $[0.3872, 0.6128]^T$, 计算结果离散度值为 1.9475, 单时段 TSC 值与负荷值最小差值为 8.5292 MW。最优调度方案的 IL 用户调度情况如表 3 所示。

为了对比优化调度前后日供电能力曲线的差异, 并验证对 IL 用户进行优化调度的有效性, 本文针对两种调度方案进行对比。方案 1 以目标函数 1 为优化目标得到曲线相似度最高的 IL 用户调度方案, 方案 2 同时以目标函数 1 和目标函数 2 为多目标优化得到最优 IL 调度方案。两种调度方案如表 4 所示。

利用 Matlab 软件计算, 得到方案 1 和方案 2 的日供电能力曲线如图 5 所示。

表 3 各时段 IL 用户调度情况

Table 3 Situation of the IL users participating in scheduling

T	被中断的用户
9	11、22、37、66
10	11、22、37、43、61、66
11	11、37、43、61、66
12	3、11、37
13	3、26、64
14	26、59、64
15	22、26、45、59、64、69
16	22、39、45、59、64、69
17	5、22、39、54
18	5、42、54
19	5、18、31、42、48、54、71
20	15、18、31、42、48、54、71
21	15、18、31、48、71

表 4 各方案 IL 用户参与调度结果
Table 4 Result of IL users participating in scheduling of each scheme

IL 用户节点	3	5	9	11	15	18	22
方案 1	—	9	19	16	—	—	18
方案 2	12	17	—	9	20	19	15
IL 用户节点	26	31	33	37	39	42	43
方案 1	10	—	—	9	14	16	19
方案 2	13	19	—	9	16	18	10
IL 用户节点	45	48	51	54	57	59	61
方案 1	20	—	19	14	—	15	9
方案 2	15	19	—	17	—	14	10
IL 用户节点	64	66	69	71			
方案 1	—	19	11	—			
方案 2	13	9	15	19			

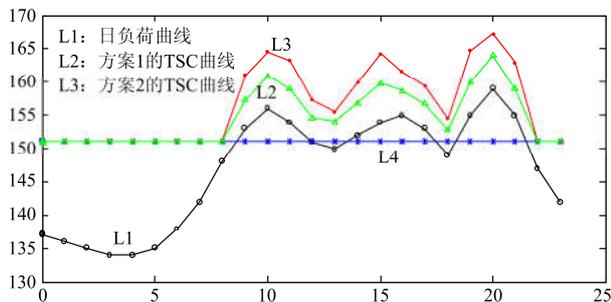


图 5 各方案 IL 用户参与调度的日供电能力曲线

Fig. 5 Daily supply capacity curve of IL users participating in scheduling

由图 5 可见，曲线 L1 表示当日负荷曲线；直线 L4 表示当不考虑 IL 用户参与调度时，配电网

TSC 值为 151.1610 MW。其余两个方案由于 IL 用户参与调度的方式不同，其最大供电能力曲线在提升能力和波动程度方面有着明显的差异。方案 1 为只以模型 1 为优化目标的负荷调度方案，由表 4 的调度结果可看出，当供电能力曲线追踪负荷曲线的能力最强时，有部分负荷未参与到调度之中，此时虽然相似度达到最大，但是供电能力的提升受到了限制，供电能力如图 5 中的 L2 曲线所示。曲线 L3 为 IL 用户按照多目标优化调度的方案 2 来中断负荷时的供电能力曲线。两个方案对比可以发现，用户在不同时间段响应负荷中断，对配电网各时段供电能力的提升有较大影响，而对 IL 用户的调度进行优化后得到的供电能力更为理想。

算例分析表明，对 IL 用户的优化调度对配电网供电能力的提升有着显著的影响，验证了本文提出的 IL 用户调度方案对配电网 TSC 的提升策略的有效性。

5 结论

本文较完整地提出了一种多时段 IL 用户优化调度的配电网 TSC 均衡提升的策略；建立了多时段 IL 用户优化调度模型，考虑了可中断负荷响应中断后配电网 TSC 的曲线与日负荷曲线的相似程度以及供电能力的提升程度，使计算结果更加符合实际。并针对模型采用遗传算法求得最优解。最后通过算例验证所提模型和算法的有效性。

随着电网的发展，可中断负荷的管理成为配电网的一种调度手段，研究其对配电网供电能力的影响具有重要意义。在此背景下，本文提出的方法能够有效地管理利用负荷以及实现可中断负荷在提升供电能力方面的电力资源的有效分配。

参考文献

- [1] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. A new model for supply capability in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [2] XIAO Jun, LI Fangxing, GU Wenzhuo, et al. Total supply capability (TSC) and associated indices for distribution planning: definition, model, calculation and applications[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2011, 5(8): 869-876.
- [3] 肖峻, 谷文卓, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联关系的配电

- 网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 72-77.
- XIAO Jun, GU Wenzhuo, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [4] 肖峻, 刘世嵩, 李振生, 等. 基于潮流计算的配电网最大供电能力模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5516-5524.
- XIAO Jun, LIU Shisong, LI Zhensheng, et al. Model of total supply capability for distribution network based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5516-5524.
- [5] 韩俊, 刘洪, 葛少云, 等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 42-47.
- HAN Jun, LIU Hong, GE Shaoyun, et al. Optimization modeling of contact structure of main transformers between substations with improved power supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 42-47.
- [6] 肖峻, 张婷, 张跃, 等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113.
- XIAO Jun, ZHANG Ting, ZHANG Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 106-113.
- [7] 李欣然, 刘友强, 朱湘友, 等. 地区中压配电网容载比的研究[J]. 继电器, 2006, 34(7): 37-50.
- LI Xinran, LIU Youqiang, ZHU Xiangyou, et al. Research on capacity-load ratio in district MV distribution networks[J]. Relay, 2006, 34(7): 37-50.
- [8] 丘文千. 用最大与最小负荷倍数法评价电网建设方案[C] // 电力系统规划学术会议论文集, 1988年10月1日, 成都: 326-328.
- [9] 周建英, 宋奕冰, 刘宪林, 等. 网络最大流法在配电网线损计算中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(5): 11-14.
- ZHOU Jianying, SONG Yibing, LIU Xianlin, et al. Application of network maximal flow in the computation of distribution network losses[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 12(5): 11-14.
- [10] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联系数的配电网系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 86-91.
- WANG Chengshan, LUO Fengzhang, XIAO Jun, et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnections of main transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [11] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 计及主变过载和联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 97-103.
- GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 97-103.
- [12] 蔡博, 黄少锋. 基于多目标粒子群算法的高维多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 77-84.
- CAI Bo, HUANG Shaofeng. Multi-objective reactive power optimization based on the multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 77-84.
- [13] 高彦聘, 潘聃, 赵蕾, 等. 基于提高供电能力的配电网协调规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(8): 43-47.
- GAO Yancheng, PAN Dan, ZHAO Lei, et al. Studies on the coordinated planning of distribution network based on improving power supply capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(8): 43-47.
- [14] LE A T, BHATTA CHARYA K. Competitive framework for procurement of interruptible load services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 889-897.
- [15] CHOW DHURY N, BILLINTON R. Interruptible load considerations in spinning reserve assessment of isolated and interconnected generating systems[J]. IEEE Proceeding, 1990, 137(2): 159-167.
- [16] TUAN L A, BHATTA CHARYA K. Competitive framework for procurement of interruptible load services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 889-897.
- [17] WU Jiguang, LIU Junyong, DUAN Dengwei, et al. Research on operation reserve capacity in power market environment[C] // DRPT 2004, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference, Hong Kong, 2004: 686-691.

- [18] 李泓泽, 王宝, 苏晨博, 等. 可中断负荷参与高峰时段市场备用选择评估及效益测算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 39-44.
LI Hongze, WANG Bao, SU Chenbo, et al. Selection assessment of interruptible load participating in market reserve during peak period and benefit measurement[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 39-44.
- [19] 肖峻, 李思岑, 王丹. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 19-25, 41.
XIAO Jun, LI Sicen, WANG Dan. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 19-25, 41.
- [20] 刘畅, 张少华, 王晔. 多时段可中断负荷调度的智能优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 105-109.
LIU Chang, ZHANG Shaohua, WANG Xian. Intelligent optimization algorithms for multi-period dispatch of interruptible loads[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 105-109.
- [21] 夏叶, 康重庆, 宁波, 等. 用户侧互动模式下发用电一体化调度计划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 17-23.
XIA Ye, KANG Chongqing, NING Bo, et al. A generation and load integrated scheduling on interaction mode on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 17-23.
- [22] 薛禹胜, 罗运虎, 李碧君, 等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 1-6.
XUE Yusheng, LUO Yunhu, LI Bijun, et al. A review of interruptible load participating in system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 1-6.
- [23] 供配电系统设计规范: GB50052—2009[S].
Code for designing electric power supply systems: GB50052—2009[S].
- [24] 国宗, 韦钢, 李明, 等. 含分布式电源的配电网供电能力评估方法[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 56-61.
GUO Zong, WEI Gang, LI Ming, et al. Assessment of power supply capability for distribution network with distributed generations[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(4): 56-61.

收稿日期: 2016-10-11; 修回日期: 2017-01-08

作者简介:

周佳林(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网供电能力; E-mail: 18331125892@163.com

刘艳(1973—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制, 智能技术在电力系统中的应用。

(编辑 魏小丽)