

考虑配电商参与的主动配电网多层分区调控

廖剑波¹, 陈冰斌¹, 戴小青¹, 符杨², 李振坤², 张路³, 陈清鹤¹, 南东亮³

(1. 国网福州供电公司, 福建 福州 350009; 2. 上海电力大学, 上海 200090;

3. 国网新疆电科院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:主动化与市场化是未来配电网发展的重要趋势,提出一种考虑配电商参与的主动配电网多层分区调控方法。构建基于调控中心、变电站综合自动化系统、配电商调控单元和子区域调控终端的多层分区调控框架;制定以“上送-决策-下发”为脉络的多层分区调控策略;建立配电商经济调度与调控中心综合优化调整2个调控核心环节的数学模型,前者旨在最大化配电商盈利,后者旨在促进配电网运行经济性、安全性、优化度与清洁性的综合提升;分析基于改进和声搜索算法的模型求解策略。算例仿真及多场景分析验证了所提调度方法的有效性和优越性。

关键词:主动配电网;配电商;多层分区调控;综合优化运行

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101018

0 引言

主动配电网 ADN(Active Distribution Network)是解决分布式电源 DG(Distributed Generation)规模化集成问题的有效技术方案^[1-2],其核心理念为通过多资源协调调控来提升配电网的 DG 兼容性与优化运行水平。当前 ADN 调控研究已积淀了一定成果:文献[3]考虑源-网-荷-储多元互补,基于随机模型预测控制实现了 ADN 有功-无功联合调控;文献[4]用鲁棒优化处理电价不确定性,研究了配电网内响应负荷与储能的经济调度问题;文献[5]提出一种可控元件动态调度优先级的评估方法,基于此实现 ADN 多元协调与多目标优化调度;文献[6]建立相变储能模型,计及其主动响应能力来实施配电网经济调度。但 ADN 的可控元件数量多、规模小、分布广,单一集中控制易造成通信阻塞与效率低等问题。为此,文献[7]提出一种全局集中与区域自治相结合的 ADN 调控策略,全局优化给出各区域交换功率计划值,区域自治则基于反馈调节控制器控制元件出力;文献[8]基于配电管理系统-区域调控终端的双层框架实施 ADN 日前-日内两阶段调控,促进了配电网的经济安全运行。

随着配、售电侧改革的不断深入^[9-10],未来配电网可向社会资本开放,具备相关资质的配电公司可参与馈线运营权竞标,从而进入配电市场;风机 WT(Wind Turbine)、光伏 PV(PhotoVoltaic)、微型燃气轮机 MT(MicroTurbine)、储能系统 ESS(Energy Storage System)、柔性负荷 FL(Flexible Load)、电动汽车

EV(Electric Vehicle)等可控单元的集成,使用户与配电网间、不同层级配电网间的双向电能交易成为可能,不同主体间的互动性得到极大提升。电网应主动适应未来配电商入网这一市场化趋势,ADN 调控应综合协调多方利益并统筹考虑网络的综合优化运行,但目前关于这方面的研究鲜有涉及。

本文计及配电商对调控的影响,构建基于调控中心 DCC(Dispatch and Control Center)、变电站综合自动化系统 SIAS(Substation Integrated Automation System)、配电商调控单元 DDCU(Distributor's Dispatch and Control Unit)、子区域调控终端 SDCT(Subregional Dispatch and Control Terminal)的 ADN 多层分区调控框架,并提出相应的调控策略;详细研究配电商经济调度与 DCC 综合优化调整 2 个调控核心环节,前者以配电商盈利最大化为目标,后者通过对前者的汇总、校验与调整,在顾及配电商利益的同时提升网络运行安全性、优化度与清洁性等;制定以改进和声搜索 IHS(Improved Harmony Search)算法为基础的调度模型求解策略;最后通过算例仿真,验证了所提调度方法的有效性和优越性。

1 ADN 的多层分区调控框架

考虑配电侧放开情形,本文假定某一馈线区域的配电运营权归属某配电商,基于此构建 ADN 的多层分区调控框架,如图 1 所示,图中实线框为各调控单元,其所在虚线框为其管辖范围。调控体系分为 4 层,分别是 ADN 的 DCC、SIAS、DDCU、SDCT,同层之间分区协作,上下层间相互支撑。

DCC 是 ADN 调控的最高中枢,内嵌多种核心功能模块,负责配电网运行全局的关键数据汇集、运行状态分析、未来态势感知和智能优化决策等。SIAS 处于承上启下的中间环节,一方面采集辖区内变电

收稿日期:2020-04-16;修回日期:2020-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51667020)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51667020)

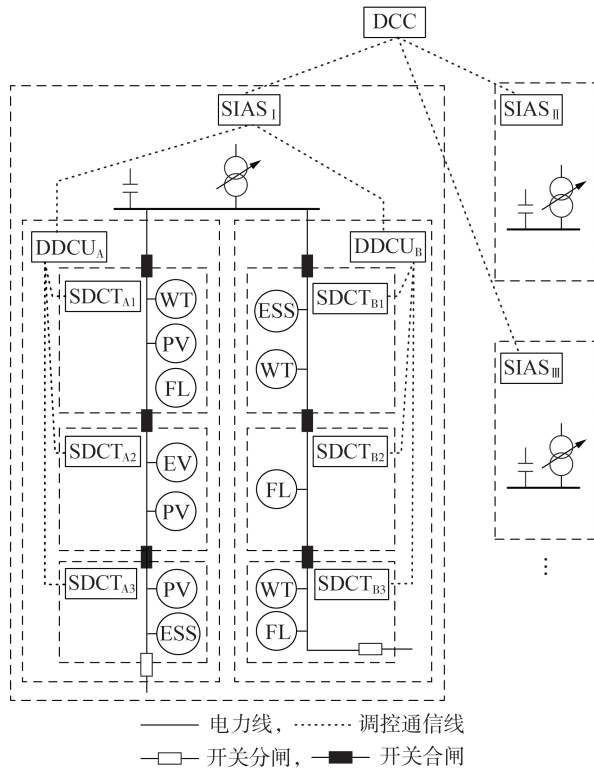


图1 ADN多层分区调控框架

Fig.1 Multi-tier and partitioned dispatch and control framework of ADN

站、配电商馈线的重要数据上传至DCC,另一方面接收DCC调控决策,在变电站施行或下发给配电商。DDCU为配电商的决策大脑,立足自身利益进行馈线管理与区域调控,其主要工作是所辖馈线的分区资源协调和区域优化决策。以分段和联络开关为界,将馈线划分为若干子区域并设置SDCT,作为调控体系的末端环节,SDCT对子区域内DG、ESS、FL、EV充电站等进行状态跟踪、资源预测、控制执行等,以实现各类分布式能源的分区整合管理。

2 ADN的多层分区调控策略

基于第1节的框架,本文提出ADN的多层分区调控策略,策略流程图见附录中图A1,主要步骤如下。

(1)信息汇集上送。SDCT对子区域的风光出力、常规负荷及FL、EV负荷进行预测,配电商基于预测数据与电价参数,以运营区域盈利最大化为目标经济调度辖区内的可控资源,并将运行方案经SIAS上报DCC。

(2)中枢优化决策。基于各配电商的调度方案,DCC开展ADN运行方式校核,将不合理方案退回配电商,然后综合考虑系统运行经济安全性与清洁能源消纳等,对调度方案进行综合优化调整。

(3)运方下发执行。最终调度方案经SIAS下发给各配电商,DDCU根据分区下发元件运行方式给

SDCT,SDCT对区内可控元件执行具体控制。

下文将针对DDCU经济调度与DCC综合优化调整2个核心环节展开具体分析与建模。

3 区域盈利最大化的配电商经济调度模型

首先明确资产归属,本文假设用户出于环保与可靠性目的自行装配DG,风电、光伏、微型燃气轮机、柴油发电机等均可并网享受发电收益,但需接受配电商调控,而ESS和EV充电站属配电商资产。配电商以运营馈线盈利最大化为目的实施经济调度:

$$\max G = I_{LD} + I_{EV} - C_{GR} - C_{DG} - C_{AM} \quad (1)$$

$$I_{LD} = \sum_{t=1}^T \gamma_{pro} p_{GR}^t P_{LD}^t L \quad (2)$$

$$I_{EV} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{EV}} \gamma_{pro} p_{GR}^t P_{EV,cha}^{t,i} L \quad (3)$$

$$C_{GR} = \sum_{t=1}^T p_{GR}^t P_{GR}^t L \quad (4)$$

$$C_{DG} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{DG}} p_{DG}^j P_{DG}^{t,j} L \quad (5)$$

$$C_{AM} = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{k=1}^{N_{IDG}} p_{IDG,cur}^k \Delta P_{IDG}^{t,k} + \sum_{m=1}^{N_{ESS}} c_{ESS} |P_{ESS}^{t,m}| + \sum_{l=1}^{N_{FL}} (p_{FL,cur}^l \Delta P_{FL,cur}^{t,l} + p_{FL,shi}^l \Delta P_{FL,shi}^{t,l} \Delta T_{FL,shi}^{t,l}) + \sum_{i=1}^{N_{EV}} [p_{EV}^i P_{EV,dis}^{t,i} + c_{EV} (P_{EV,cha}^{t,i} + P_{EV,dis}^{t,i})] \right\} L \quad (6)$$

其中, G 为配电商总盈利; I_{LD} 为向负荷售电收入; I_{EV} 为EV充电收入; C_{GR} 为向上级电网购电成本; C_{DG} 为向DG购电成本; C_{AM} 为主动管理成本,包括弃风光补偿成本、储能运维成本、FL削减和平移补偿成本、EV放电补偿和充电站运维成本; T 为调度日时段数; L 为各时段的时间间隔; γ_{pro} 为售电盈利系数,设为1.15; p_{GR}^t 为 t 时段配电商与上级电网的交易电价; P_{LD}^t 为 t 时段区域总负荷(计及FL削减与平移); N_{DG} 、 N_{IDG} 、 N_{ESS} 、 N_{FL} 、 N_{EV} 分别为区域内DG、间歇DG、储能、FL、充电站中EV的总数量; $P_{EV,cha}^{t,i}$ 、 $P_{EV,dis}^{t,i}$ 分别为 t 时段第 i 辆EV的充电功率与放电功率,充电时 $P_{EV,cha}^{t,i}$ 为正值、 $P_{EV,dis}^{t,i}$ 为0,放电时 $P_{EV,dis}^{t,i}$ 为正值、 $P_{EV,cha}^{t,i}$ 为0; P_{GR}^t 为 t 时段配电商与上级电网的交互功率,正值为母线注入馈线,负值为馈线倒供; p_{DG}^j 为第 j 个DG的上网电价; $P_{DG}^{t,j}$ 为 t 时段第 j 个DG有功出力; $p_{IDG,cur}^k$ 为第 k 个间歇DG弃风光补偿价格; $\Delta P_{IDG}^{t,k}$ 为 t 时段第 k 个风光DG削减量; c_{ESS} 、 c_{EV} 分别为储能电池与EV充电桩的单位运维成本; $P_{ESS}^{t,m}$ 为 t 时段第 m 个储能有功出力,正值为放电,负值为充电; $p_{FL,cur}^l$ 、 $p_{FL,shi}^l$ 分别为 t 时段FL削减与平移的补偿价格; $\Delta P_{FL,cur}^{t,l}$ 为 t 时段第 l 个FL削减量; $\Delta P_{FL,shi}^{t,l}$ 、 $\Delta T_{FL,shi}^{t,l}$ 分别为 t 时段第 l 个

FL平移量及平移时段数; p_{EV}^t 为 t 时段EV放电补偿价格。

需考虑的约束条件如下。

(1)网络运行约束。

$$P_{GR}^t + \sum_{j=1}^{N_{DG}} P_{DG}^{t,j} + \sum_{m=1}^{N_{ESS}} P_{ESS}^{t,m} + \sum_{i=1}^{N_{EV}} P_{EV,dis}^{t,i} = P_{LD}^t + \sum_{i=1}^{N_{EV}} P_{EV,cha}^{t,i} \quad (7)$$

$$V_{\min} \leq V^{t,r} \leq V_{\max} \quad (8)$$

其中, $V^{t,r}$ 为 t 时段节点 r 电压, $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别为其上、下限,本文分别取1.05倍和95%的额定电压。

(2)DG约束。

$$P_{DG}^{t,j} \leq P_{DG,max}^j \quad (9)$$

$$|P_{DG}^{t+1,j} - P_{DG}^{t,j}| \leq \Delta P_{DG,max}^j \quad (10)$$

$$\Delta P_{IDG}^{t,k} \leq \Delta P_{IDG,max}^{t,k} \quad (11)$$

其中, $P_{DG,max}^j$ 为第 j 个DG有功上限; $\Delta P_{DG,max}^j$ 为相邻时段第 j 个DG允许调节的最大有功; $\Delta P_{IDG,max}^{t,k}$ 为 t 时段第 k 个间歇DG允许削减的最大有功。

(3)ESS约束。

$$P_{ESS,min}^m \leq P_{ESS}^{t,m} \leq P_{ESS,max}^m \quad (12)$$

$$S_{ESS,min}^m \leq S_{ESS}^{t,m} \leq 1 \quad (13)$$

$$S_{ESS}^{t+1,m} = S_{ESS}^{t,m} - \left(\alpha_{cha}^{t,m} \frac{P_{ESS}^{t,m} \eta_{ESS}^m}{E_{ESS}^m} + \alpha_{dis}^{t,m} \frac{P_{ESS}^{t,m}}{E_{ESS}^m \eta_{ESS}^m} \right) L \quad (14)$$

$$S_{ESS}^{0,m} = S_{ESS}^{24,m} \quad (15)$$

其中, $P_{ESS,max}^m$ 、 $P_{ESS,min}^m$ 分别为储能的最大放电功率(正值)和最大充电功率(负值); $S_{ESS}^{t,m}$ 为 t 时段第 m 个储能电池的荷电状态SOC(State Of Charge); $S_{ESS,min}^m$ 为第 m 个储能电池的最大放电深度; $\alpha_{cha}^{t,m}$ 、 $\alpha_{dis}^{t,m}$ 分别为 t 时段第 m 个储能电池的充、放电状态系数,充电时 $\alpha_{cha}^{t,m} = 1$ 、 $\alpha_{dis}^{t,m} = 0$,放电时 $\alpha_{cha}^{t,m} = 0$ 、 $\alpha_{dis}^{t,m} = 1$; E_{ESS}^m 为第 m 个储能电池容量; η_{ESS}^m 为第 m 个储能电池充放电效率。

(4)FL约束。

$$\Delta P_{FL,cur}^{t,l} \leq \Delta P_{FL,cur,max}^{t,l} \quad (16)$$

$$\Delta P_{FL,shi}^{t,l} \leq \Delta P_{FL,shi,max}^{t,l} \quad (17)$$

$$\Delta T_{FL,shi}^{t,l} \leq \Delta T_{FL,shi,max}^{t,l} \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_{FL}} \Delta P_{FL,shi}^{t,l} = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_{FL}} \Delta P_{FL,shi-in}^{t,l} \quad (19)$$

其中, $\Delta P_{FL,cur,max}^{t,l}$ 、 $\Delta P_{FL,shi,max}^{t,l}$ 分别为 t 时段第 l 个FL允许削减与平移的最大负荷量; $\Delta T_{FL,shi,max}^{t,l}$ 为 t 时段第 l 个FL平移的最大允许延迟供电时间; $\Delta P_{FL,shi-in}^{t,l}$ 为 t 时段第 l 个FL平移的移入负荷量。

(5)EV充电站约束。

与ESS类似,EV充电需满足功率与SOC的上下限约束,本文不再赘述。还应符合:

$$S_{EV}^{t_0,i} + \sum_{t \in T_{EV}^i} \left(\frac{P_{EV,cha}^{t,i} \eta_{EV}^i}{E_{EV}^i} - \frac{P_{EV,dis}^{t,i}}{E_{EV}^i \eta_{EV}^i} \right) L \geq S_{EV,aim} \quad (20)$$

其中, $S_{EV}^{t_0,i}$ 为第 i 辆EV初始SOC, t_0 为EV入网充电时刻; $S_{EV,aim}$ 为EV充电目标SOC,设为90%; T_{EV}^i 为第 i

辆EV并网时段,由入、离网时刻决定; E_{EV}^i 为第 i 辆EV电池容量; η_{EV}^i 为第 i 辆EV充放电效率。

4 DCC的综合优化调整模型

汇总各配电商调控计划并通过全网运方校核后,DCC对原调度方案进行综合优化调整。区别于传统经济调度,DCC综合优化调度应统筹兼顾配电商利益、ADN运行安全性、运行优化度、风光消纳率等多方面因素。

4.1 减少对配电商盈利的影响

调度调整应考虑经济效益,尽可能减少对配电商盈利的影响:

$$\min F_1 = \frac{\sum_{n=1}^{N_{DI}} (G_0^n - G^n)}{\sum_{n=1}^{N_{DI}} G_0^n} \quad (21)$$

其中, N_{DI} 为配电商数量; G_0^n 为第 n 个配电商上报调度方案对应的理想盈利值; G^n 为调度调整后第 n 个配电商的实际盈利值。

4.2 提高ADN运行安全性

本文主要从故障失负荷的角度来考量配电网运行安全性。ADN发生故障后可通过联络线进行负荷转供,也可基于ESS与稳定DG建立孤岛以减少失负荷。计及负荷转供与孤岛运行,展开ADN静态安全分析,计算各时段 $N-1$ 支路故障的失负荷量,定义故障失负荷率指标为:

$$\min F_2 = \frac{\sum_{t=1}^T \max_d \{P_{LD,los}^{t,d}\}}{\sum_{t=1}^T P_{LD}^t} \quad (22)$$

其中, $P_{LD,los}^{t,d}$ 为 t 时段支路 d 发生故障后ADN的失负荷量。式中分子表示各时段最严重支路故障的失负荷量之和,分母表示理想供电负荷量。

故障失负荷率越小,严重支路故障后能正常供电的负荷越多,ADN安全性越优。

4.3 提高ADN运行优化度

(1)电压波动性。

节点电压的时序分布越偏离电压平均值,其电压波动性越强;电压在运行日各时段剧烈波动将增加ADN运行风险,不利系统稳定,还可能引起电能质量问题。用电压波动最强节点的电压偏离均值水平来定义电压波动性指标:

$$K_{VF} = \max_r \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |V^{t,r} - \bar{V}^r|}{\bar{V}^r} \quad (23)$$

其中, $\bar{V}^r$ 为节点 r 各时段的电压均值, $\bar{V}^r = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T V^{t,r}$ 。式中分子表示节点电压偏离均值的平均水平,分母

表示理想电压值(均值)。

电压波动性指标越小,波动性最强节点的时序电压分布越贴近其电压均值,网络电压波动性越弱。

(2)削峰填谷执行度。

调动 ADN 丰富的可控资源实施削峰填谷,有利于缓解峰时供电压力,促进发-用电平衡及负荷曲线平滑。定义削峰填谷执行度指标为:

$$K_{PV} = \frac{(P_p - P_v) - (P_{p,0} - P_{v,0})}{P_{p,0} - P_{v,0}} \quad (24)$$

其中, $P_{p,0}$ 为理想削峰后的峰荷值, $P_{v,0}$ 为理想填谷后的谷荷值,理想削峰指峰荷时不计代价地调动所有可控资源以最大限度地降低负荷,理想填谷含义类似; P_p 、 P_v 分别为实际调度方案的峰荷值与谷荷值。式中分子表示实际与理想峰谷差的差值,分母表示 ADN 日运行的理想峰谷差。

削峰填谷执行度指标越小,ADN 峰谷差越接近理想状态,削峰填谷效果越佳。

(3)提高运行优化度。

将 K_{VF} 与 K_{PV} 进行组合来衡量 ADN 优化运行度。首先进行指标的归一化处理,本文采用离差标准化的方法,具体公式为:

$$f^* = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (25)$$

其中, f 为某评价指标; f^* 为归一化后的指标; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 分别为指标最大值与最小值,分别对应最恶劣与最理想情形下的指标值。具体应用中, $K_{VF, \max}$ 、 $K_{VF, \min}$ 分别为电压波动性指标的最大值与最小值, $K_{PV, \max}$ 、 $K_{PV, \min}$ 分别为削峰填谷执行度的最大值与最小值, $K_{VF, \max}$ 对应节点电压均取 1.05 倍的额定电压(或 95% 的额定电压,取偏离均值远者)的情形, $K_{PV, \max}$ 对应实际峰谷差为调度前原始值的情形, $K_{VF, \min}$ 、 $K_{PV, \min}$ 均为 0(实际值与理想值相同的情形)。

将归一化的 2 个指标加权组合衡量 ADN 的优化运行度:

$$\min F_3^* = \lambda_1 K_{VF}^* + \lambda_2 K_{PV}^* \quad (26)$$

其中, K_{VF}^* 、 K_{PV}^* 分别为归一化后的电压波动性指标和削峰填谷执行度指标; λ_1 、 λ_2 为指标权重,本文认为电压波动性与峰谷差在表现运行优化度上同等重要,其值均取 0.5。

4.4 提高清洁能源消纳率

ADN 的重要价值在于间歇 DG 的有效兼容与清洁能源的高额消纳,少发生或不发生弃风光应纳入 DCC 综合优化调整的考虑。定义弃风光率指标为:

$$\min F_4 = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{IDG}} \Delta P_{IDG}^{t,k}}{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{IDG}} P_{IDG,0}^{t,k}} \quad (27)$$

其中, $P_{IDG,0}^{t,k}$ 为 t 时段第 k 个间歇 DG 初始理想有功

出力。

弃风光率越小,清洁能源消纳越多,系统运行清洁能源程度越高。

4.5 多目标组合

上述各子目标均以实际值与理想值的差值占理想值比例的思想来构建,均无量纲,指标值均在 $[0, 1]$ 区间内且越小越优。通过加权组合的方法将多目标转化为单目标:

$$\min F^* = \omega_1 F_1^* + \omega_2 F_2^* + \omega_3 F_3^* + \omega_4 F_4^* \quad (28)$$

$$\omega_s = \frac{\omega_{s, AHP} + \omega_{s, EWM}}{\sum_{q=1}^4 (\omega_{q, AHP} + \omega_{q, EWM})} \quad (29)$$

其中, F_1^* 、 F_2^* 、 F_4^* 分别为 F_1 、 F_2 、 F_4 按照式(25)进行归一化后的指标,指标最大值均为 1(分别对应不盈利、负荷全停、风光全切的最恶劣情形),最小值均为 0(分别对应最大盈利、负荷全供、风光全额消纳的最理想情形); ω_s ($s=1, 2, 3, 4$) 为权重系数; $\omega_{s, AHP}$ 、 $\omega_{s, EWM}$ 分别为层次分析法与熵权法计算的权重值。

层次分析法是一种根据指标间相对重要性来计算权重的主观赋权法,熵权法则基于数据样本自身的随机离散度来确定客观权重值,2 种算法的详细公式见文献[11]。本文采用层次分析-熵权法[5]来计算各权重系数,兼顾专家经验与数据自身性质的主、客观 2 个方面,得到合理可靠的权重值。

DCC 的综合优化调整同样需要考虑网络运行及各可控元件的诸项约束条件,本文不再赘述。

5 基于 IHS 的调度模型求解策略

和声搜索 HS(Harmony Search)算法是一种新兴的智能优化算法,由于其全局搜索能力强、待控参数少、适用性广等优点,近年来已成功应用于 DG 出力预测[12]、ADN 规划[13]、调控[8]等问题的求解。HS 算法源于对乐师演奏和调音过程的模拟,待优化和声即为潜在解,算法的详细步骤可参考文献[14]。对 HS 新和声生成机制进行改进,每次迭代生成新和声群而非单一和声;群中一部分和声采用库内继承、音调微调、随机生成的常规生成方式;另一部分效仿粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)算法个体与种群协作联动的搜索机制,基于常规生成后向当前最优和声学习,进行最优方向的局部搜索,具体方式如式(30)所示,如此来提高算法的局部搜索能力,形成 IHS 算法。

$$\begin{cases} v_z^{\text{new}} = c_{\text{lea}} \cdot \text{rand} \cdot (x_z^{\text{best}} - x_z^{\text{new}}) \\ x_z^{\text{new}} = x_z^{\text{new}} + v_z^{\text{new}} \end{cases} \quad (30)$$

其中, x_z^{new} 、 x_z^{best} 分别为新和声与当前最优和声的第 z 维分量; v_z^{new} 为新和声第 z 维分量的更新速度; c_{lea} 为学习因子; rand 为 $(0, 1)$ 间均匀分布随机数。

基于 IHS 的模型求解策略流程见附录中图 A2。

6 算例与分析

6.1 算例参数说明

以i5-6200U CPU 8 GB RAM计算机上MATLAB 2014A为平台,基于附录中图A3所示的ADN算例进行调控仿真。馈线A为居民区,馈线B为商业区,馈线C为工业园区,负荷曲线见文献[15]。3条馈线的运营权分属3家配电公司,配电商根据开关划分子区域,设置SDCT进行资源分区管理,并配置各自的DDCU总揽馈线调控;DCC经由SIAS实现对变电站、配电商馈线的监测与调控。开关 S_5 用于支路4的负荷转供,馈线B、C可通过开关 S_{12} 实现相互转供。各风机、光伏和微型燃气轮机的额定容量均为0.5 MW。储能电池组的最大充放电功率为0.5 MW,额定容量为2 MW·h,初始SOC为90%,最大放电深度为10%。节点4—6、20—22、28—31处为FL,其中可削减负荷占10%,可平移负荷占20%,假设某时段同一馈线的FL按相同比率进行削减和平移且移入相同时段。EV集群的入、离网时刻与初始SOC由蒙特卡罗模拟得到,概率分布及EV电池参数见文献[5]。配电商与上级电网基于分时电价进行结算,调度日电价为谷时(00:00—07:00)0.33元/(kW·h),平时(07:00—10:00、21:00—24:00)0.51元/(kW·h),峰时(10:00—21:00)0.68元/(kW·h)。DG上网电价为微型燃气轮机0.52元/(kW·h),风电0.57元/(kW·h),光伏0.65元/(kW·h)。为便于负荷平移与EV充电管理,调度周期取某日10:00至次日10:00。

各配电商区域的负荷与风光出力预测曲线如图2所示。

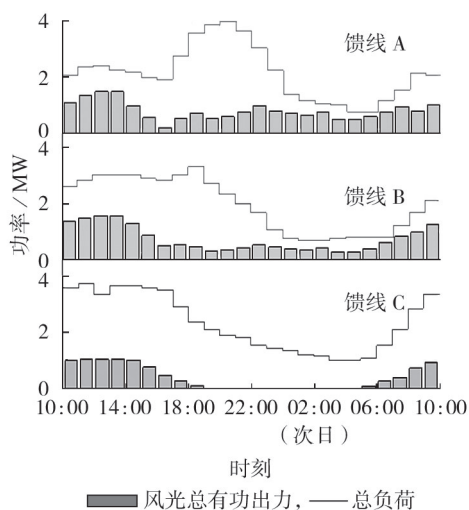


图2 风光荷预测曲线

Fig.2 Forecast curve of WTs, PVs and loads

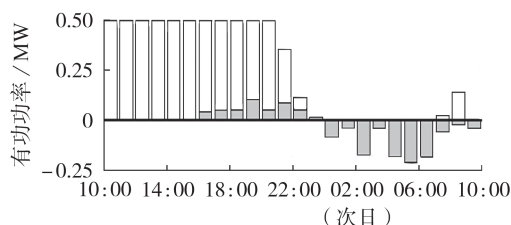
在DCC调度调整的权重系数计算中,熵权法所需的数据样本在可行域内随机生成,规模取100个,基于该解集的各子目标函数观测值挖掘子目标的变异度信息,进而求取客观权重;重要度方面认为调控

安全性最重要,经济性与优化度次之,清洁性重要度最低。层次分析法的判断性矩阵 A (各行/列对应相应子目标)为:

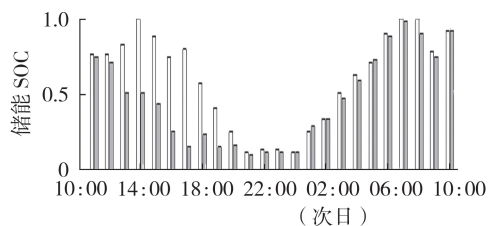
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1 & 5 \\ 4 & 1 & 4 & 7 \\ 1 & 1/4 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/7 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

6.2 仿真结果

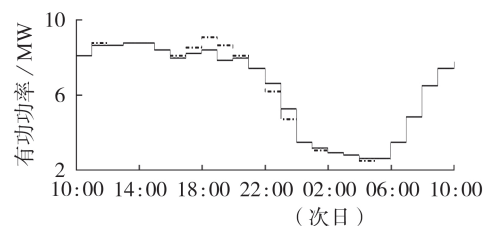
权重系数 $\omega_1 \sim \omega_4$ 的计算结果分别为0.2307、0.3761、0.2861、0.1070。ADN各可控元件的日调度方案如图3所示。微型燃气轮机峰时满发,在缓解供电压力的同时降低配电商购电成本,平时低发过渡,谷时停机以防止资源浪费。EV用户在傍晚时段回家后陆续入网充电,次日上午充满离网;充电站基于峰放谷充进行调度,峰时利用EV剩余电量放电来支撑峰荷,谷时再开始大规模对EV充电,避免了常规负荷与EV负荷的双峰叠加,并促进了谷荷增填。储能充放电与风光资源和负荷需求相适应,在净负荷和电价较高的峰时放电、电价较低的谷时充电,有益于平抑风光波动、缩小峰谷差与低储高发套利。



时刻
□ MT, ■ EV 充电站
(a) MT 和 EV 充电站



时刻
— 风储, — 光储
(b) 储能



时刻
--- 原始负荷, — 计及FL后的负荷
(c) 总负荷

图3 ADN各元件的调度方案

Fig.3 Dispatch scheme of each component in ADN

负荷较重时段适当削减FL,峰-平、平-谷时段进行FL平移,通过FL管理来引导科学用电并促进电网降损与削峰填谷。调度日无弃风光,可再生绿色电能全额消纳。

6.3 多场景分析

为进一步分析调控效果,建立3种场景:Case 1,无调度(EV无序快速充电);Case 2,各配电商分区经济调度;Case 3,经DCC调整的综合优化调度。对比分析3种场景下ADN运行的经济性、安全性、优化度与清洁性等。各场景下电网运行的详细指标数据如表1所示。

表1 多场景参数对比

场景	配电商盈利/元			故障失负荷率	电压波动性	峰谷差/MW	运行优化度	弃风光率
	馈线A	馈线B	馈线C					
Case 1	3188	3226	3955	0.2072	0.2870	6.3492	0.6435	0
Case 2	4039	3280	5467	0.2037	0.2341	4.2333	0.3431	0.0476
Case 3	3585	2934	5171	0.1977	0.1902	3.6379	0.2440	0

Case 2下经济调度能够最大化各配电商盈利,但存在不合理之处,如峰时仍大规模售电、未执行负荷管理,因峰时电价高、盈利空间大,FL削减与平移会降低售电收益且需额外的调度成本,逐利策略下配电商显然会将其忽略。Case 3下的配电商盈利低于Case 2,DCC以盈利的少量降低为代价,提升了ADN整体的优化运行水平。值得注意的是,配电商B的盈利能力明显不及配电商A和C,其原因在于馈线B的可控元件少(仅用户风光与FL)、调控能力薄弱,有限的盈利反而能督促配电商加快储能、充电站等设施建设,进而提升ADN可控性与供电服务水平。

某支路发生故障后,上游与主网相连的支路、下游可转供或孤岛运行的支路不停电,故障支路、下游既无法转供也无法孤岛运行的支路以及下游不满足功率平衡的孤岛内的部分负荷将停电。算例网架结构较强,除支路1、2故障将在下游形成孤岛外,其余支路故障均仅为故障支路停电,而不波及下游,失负荷量较小。各时段最严重支路故障的失负荷量如图4所示。为便于对比,附录中图A4列出了Case 2与Case 3下的失负荷量之差。各时段的最严重故障集中发生在支路1、3、8,其中失负荷量最高的故障均发生在支路1,这是由于支路1位于馈线首端,故障后下游形成以储能为平衡节点的较大孤岛,峰时孤岛电源功率不足,造成支路1与孤岛均发生失负荷。综合指标与曲线可知,Case 3下调度的故障保供能力与安全性最优。

Case 1—3下电压波动性最强的节点分别为节点16、24、10,其时序电压曲线如图5所示(图中电压

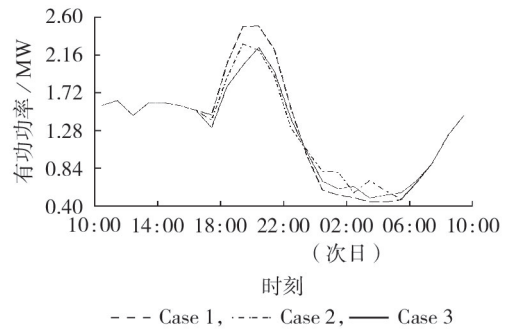


图4 各时段最严重支路故障失负荷量

Fig.4 Load loss of most serious branch fault in each period

幅值为标么值,虚线表示该节点的电压均值)。由图中可知,Case 1下电压波动剧烈,峰时发生电压越下限;Case 2、3的波动性明显减弱,后者的电压曲线较为集中地分布在均值附近。结合电压波动性指标可知,Case 3下指标值最低,电压波动性最小。

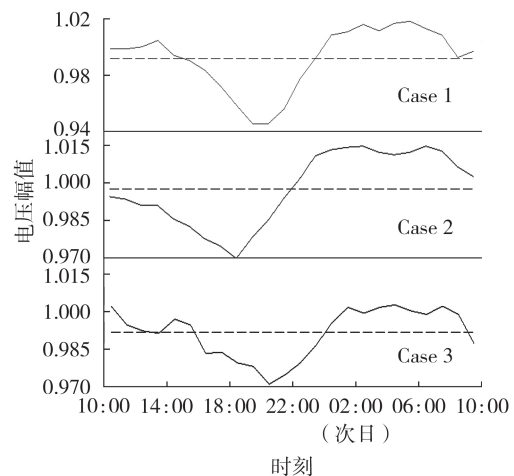


图5 电压波动性最强节点的时序电压分布

Fig.5 Time series voltage distribution of nodes with strongest voltage fluctuation

不同场景下的净负荷曲线如图6所示,其中原始负荷为不计风光的初始负荷值。观察曲线易知,Case 3下的削峰填谷效果明显,负荷分布最为均匀,峰谷差最小。综合电压波动与峰谷差可知,Case 3

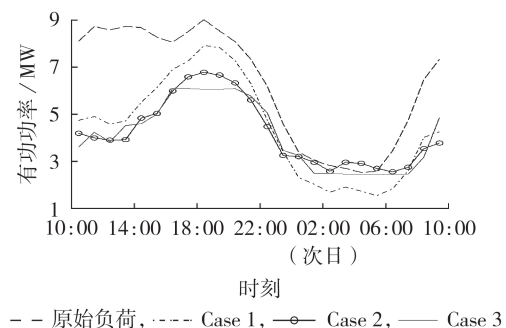


图6 净负荷曲线

Fig.6 Net load curves

下的运行优化度指标值最低,ADN优化运行水平最高。

Case 2下谷时发生了少量弃风光,这是由于谷时负荷低、电力供应充足且主网购电费用较低,单一逐利会造成一定的风光削减;相比较而言,Case 3下实现了绿色电能的全额消纳,清洁性较佳。另外,图6中Case 2下的填谷效果稍优于Case 3,其原因在于前者存在弃风光,净负荷变大。

权重影响分析与算法性能分析见附录中表A1与图A5。

7 结论

ADN是多元件协调互补、多主体利益交融的清洁、高效、开放的新型智能配电平台。本文考虑配电商持有馈线运营权这一市场化情形,提出ADN多层分区调控的框架及策略,建立相关数学模型并实现求解。算例结果说明:所得综合优化调度方案合理可行,各元件运行方式能够适应不同的负荷需求与网络状态,基于多元协调形成对配电网的有力支撑;多场景的对比表明,逐利策略的配电商调度具有一定的片面性,而DCC基于对ADN运行经济性、安全性、优化度和清洁性的统筹来实施调度调整,以盈利的少量降低为代价,提升了配电网的综合运行水平;完全放任配电商自由调度难以实现ADN资源的最优化配置,馈线运营权开放情形下DCC对电网运行的宏观节制和调整十分必要而关键。

未来研究可考虑从以下两方面着手:深入挖掘ADN其他市场化因素对调控的影响,如交易电价的不确定性、配电商面临的市场风险等;将ADN多层分区调控体系推广至其他研究课题,如基于DDCU与SDCT互动修正的日内调度,DDC、SIAS、DDCU协作的多层级无功电压优化,故障后DCC主导的分区自愈决策等。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 吴忠强,赵立儒. 基于萤火虫算法的主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):149-154.
WU Zhongqiang,ZHAO Liru. Optimal dispatch of active distribution network based on firefly algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3):149-154.
- [2] 张江林,庄慧敏,刘俊勇,等. 分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):15-21,29.
ZHANG Jianglin,ZHUANG Huimin,LIU Junyong,et al. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):15-21,29.
- [3] 徐韵,颜湘武,李若瑾,等. 电力市场环境下的“源-网-荷-储”互动的主动配电网有功/无功联合优化[J]. 电网技术,2019,43(10):3778-3789.
- XU Yun,YAN Xiangwu,LI Ruojin,et al. Joint optimization of active and reactive powers in active distribution network with “generation-grid-load-energy storage” interaction in power market environment[J]. Power System Technology,2019,43(10):3778-3789.
- [4] SOROUDI A,SIANO P,KEANE A. Optimal DR and ESS scheduling for distribution losses payments minimization under electricity price uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):261-272.
- [5] 黄伟,熊伟鹏,华亮亮,等. 基于动态调度优先级的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3486-3498.
HUANG Wei,XIONG Weipeng,HUA Liangliang,et al. Multi-objective optimization dispatch of active distribution network based on dynamic schedule priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(15):3486-3498.
- [6] 杜进桥,李艳,随权,等. 基于相变储能系统主动响应能力挖掘的配电网经济调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):210-217.
DU Jinqiao,LI Yan,SUI Quan,et al. Economic dispatch of distribution network based on active response capability mining of phase change material energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):210-217.
- [7] 苏小林,吴富杰,阎晓霞,等. 主动配电网的分层调控体系及区域自治策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(6):129-134,141.
SU Xiaolin,WU Fujie,YAN Xiaoxia,et al. Hierarchical coordinated control system of active distribution network and its regional autonomy strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(6):129-134,141.
- [8] 廖剑波,陈清鹤,监浩军,等. 主动配电网的日前-日内两阶段优化调度[J]. 现代电力,2020,37(1):27-34.
LIAO Jianbo,CHEN Qinghe,JIAN Haojun,et al. Day-ahead and intraday two-stage optimal dispatch of active distribution network[J]. Modern Electric Power,2020,37(1):27-34.
- [9] 张晓萱,薛松,杨素,等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):1-8.
ZHANG Xiaoxuan,XUE Song,YANG Su,et al. International experience and lessons in power sales side market liberalization[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(9):1-8.
- [10] 沈运帷,李扬,焦系泽,等. 新电改背景下需求响应成本效益分析及其融资渠道[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):124-130,138.
SHEN Yunwei,LI Yang,JIAO Xize,et al. Cost-benefit analysis and financing channels for demand response under electric reform[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):124-130,138.
- [11] 刘宇彬,刘建华. 基于层次分析法和熵权法的电网风险评估[J]. 电力科学与工程,2013,29(11):37-43.
LIU Yubin,LIU Jianhua. Risk assessment of power networks based on AHP and entropy weight method[J]. Electric Power Science and Engineering,2013,29(11):37-43.
- [12] 李元诚,王蓓,王旭峰. 基于和声搜索-高斯过程混合算法的光伏功率预测[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):13-18.
LI Yuancheng,WANG Bei,WANG Xufeng. Photovoltaic power forecasting based on harmony search and Gaussian process algorithms[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):13-18.
- [13] 严艺芬,吴文宣,张逸,等. 考虑区域能源供应商利益的主动配电网间歇性分布式电源优化配置[J]. 电网技术,2017,41(3):752-759.
YAN Yifen,WU Wenxuan,ZHANG Yi,et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation in active distribution network considering benefit of regional energy supplier

- [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 752-759.
- [14] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [15] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, SHUN T Z. Demand side management in smart grid using heuristic optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1244-1252.

作者简介:

廖剑波(1991—),男,福建三明人,工程师,硕士,主要研究方向为主动配电网规划及调控运行(E-mail: liaojianbox@163.com);



廖剑波

陈冰斌(1974—),女,福建莆田人,高级工程师,主要研究方向为城市配电网规划;

戴小青(1982—),男,江西抚州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为城市配电网规划;

符杨(1968—),男,江苏南通人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为城市配电网规划、海上风电并网技术(E-mail: mfudong@126.com)。

(编辑 王锦秀)

Multi-tier and partitioned dispatch and control of active distribution network considering participation of distributors

LIAO Jianbo¹, CHEN Bingbin¹, DAI Xiaoqing¹, FU Yang², LI Zhenkun², ZHANG Lu³,
CHEN Qinghe¹, NAN Dongliang³

(1. State Grid Fuzhou Electric Power Supply Company, Fuzhou 350009, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: Active and market-oriented are the important development trend of distribution network in the future. A multi-tier and partitioned dispatch and control method of active distribution network considering the participation of distributors is proposed. A multi-tier and partitioned dispatch and control framework based on the dispatch and control center, substation integrated automation system, dispatch and control unit of distributors and sub-regional dispatch and control terminal is constructed. A multi-tier and partitioned dispatch and control strategy with the context of “send-decision-issue” is developed. The mathematical models of two core dispatch and control links of economic dispatch of distributors and comprehensively optimal adjustment of dispatch and control center are built, the former aims to maximize the profit of distributors, while the latter aims to comprehensively promote the economy, safety, optimization and cleanliness of distribution network operation. The model solving strategy based on the improved harmony search algorithm is analyzed. The effectiveness and superiority of the proposed dispatch method are verified by case simulation and multi-case analysis.

Key words: active distribution network; distributor; multi-tier and partitioned dispatch and control; comprehensively optimal operation

附录：

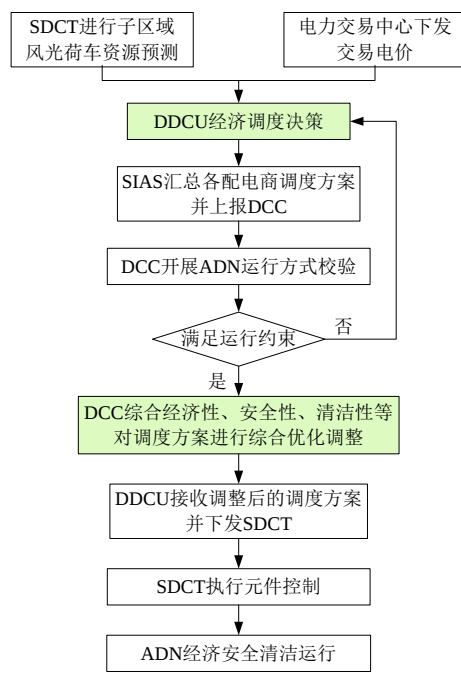


图 A1 AND 的多层分区调控策略流程图

Fig.A1 Flowchart of multi-tier and partitioned dispatch and control strategy of AND

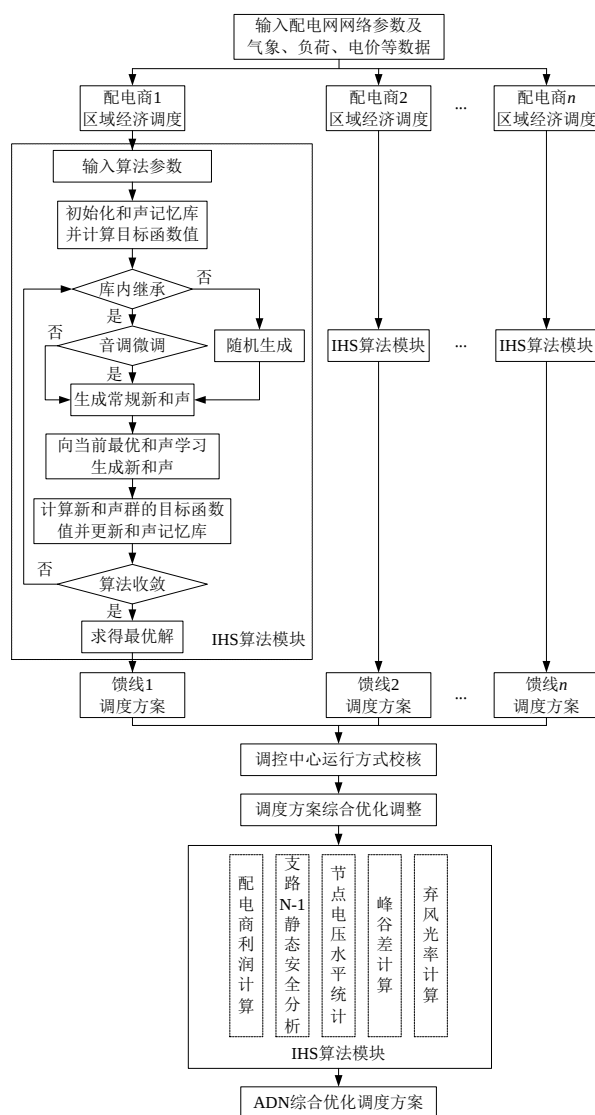


图 A2 基于改进和声搜索算法的调度模型求解策略流程图

Fig.A2 Flowchart of dispatch model solving strategy based on IHS

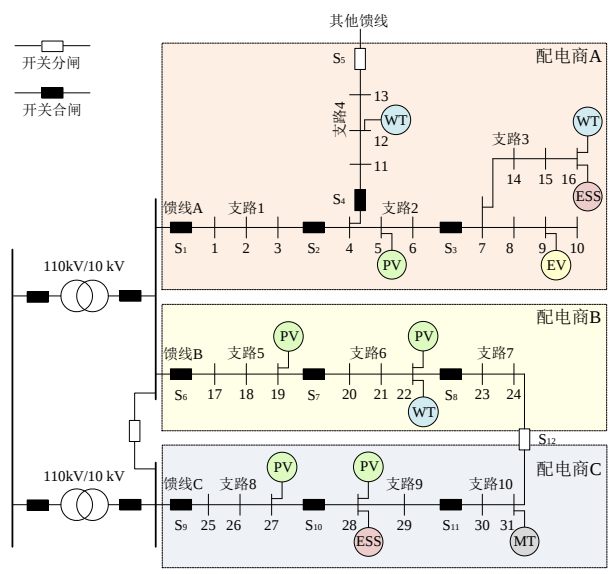


图 A3 ADN 算例网络结构

Fig.A3 Network structure of ADN case

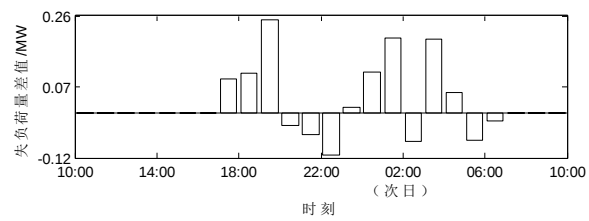


图 A4 Case 2 与 Case 3 的失负荷量差值

Fig.A4 Load loss difference between Case 2 and Case 3

表 A1 不同权重选取策略的参数对比

Table A1 Parameters comparison among different weight selection strategies

参数	Case A	Case B	Case C
ω_1	0.184 5	0.277 0	0.230 7
ω_2	0.581 1	0.171 2	0.376 1
ω_3	0.184 5	0.387 8	0.286 1
ω_4	0.049 9	0.164 1	0.107 0
F_1	0.087 5	0.091 2	0.085 7
F_2	0.193 1	0.203 5	0.197 7
F_3	0.250 2	0.232 6	0.244 0
F_4	0	0	0
F	0.174 5	0.150 3	0.163 9

表 A1 列出了不同权重选取策略下的权重系数值、最优解子目标及总目标函数值，其中 Case A 为层次分析法主观权重，Case B 为熵权法客观权重，Case C 为主、客观混合权重。分析表 A1 可知，主观权重依调控经验最重安全性，客观权重则挖掘出运行优化度子目标的随机变异性最强、信息量最大，混合权重对两者进行了折中，不同的权重选取策略最终形成了偏向各异的 ADN 调度方案。在实际应用中，权重系数可依据 DCC 调控的主客观决策偏好与子目标侧重点来灵活调整。

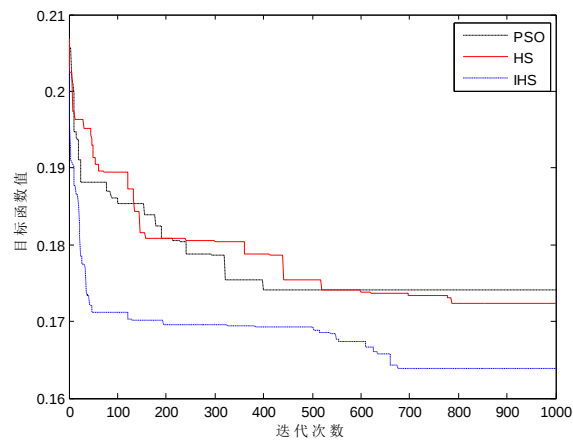


图 A5 不同算法的收敛曲线

Fig.A5 Convergence curves of different algorithms

图 A5 给出了 PSO、HS、IHS 求解综合优化调度问题的收敛曲线。由图易知 PSO 迭代至近 400 代即发生早熟、陷入局部最优；HS 局部搜索能力偏弱、寻优进程缓慢；IHS 经 600 余代寻优求得最优解且目标函数值最低，由于改进了新解生成机制，其迭代寻优效率与最优解质量远高于 PSO 与 HS。计算时间方面，

PSO、HS、IHS 分别耗时 578、655、2 320 s。优化调控问题本身维度高、约束复杂，又嵌入了利润计算、静态安全分析等功能模块，求解颇为耗时；加之 IHS 每次迭代需生成和声群并向最优和声方向进行局部寻优，故而 IHS 更为耗时，但已能满足 DCC 日前决策的需求。