

基于一致性耦合关联的交直流混合配电网协调能量管控

张凡¹,高红均¹,李海波²,刘友波¹,刘俊勇¹

(1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2. 清华四川能源互联网研究院,四川 成都 610042)

摘要:交直流混合配电网是未来电网的一个重要形态,其能量管控研究具有重要意义。对多源并入的交直流混合配电网搭建局部和区域双层调度模型,提出交直流混合配电网的分布式调度优化策略。在局部调度层,考虑可再生分布式能源和储能设备联合出力,保证对负荷的平稳供给,并将优化调度结果上传给区域调度层;在区域调度层,对交流区域和直流区域各自进行独立优化,充分考虑各区域的自主运行特性,同时满足交直流混合配电网的运行约束条件,并提出基于一致性理论的分布式能量管控方法,获得最优可行解。算例结果验证了所提策略的有效性。

关键词:交直流混合配电网;能量管控;一致性约束;分布式优化

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009022

0 引言

各种分布式能源 DG(Distributed Generation)的接入使传统配电网面临许多新问题。现今主要存在的交流配电网适应于交流分布式电源的接入,直流分布式电源和直流负荷接入则需要加装电力电子装置进行交直流转换,既增加了成本,又降低了效率^[1-2]。基于此,在考虑原有交流配电网基础设施建设现状的基础上,交直流混合配电网随着直流配电网的发展而逐渐兴起,这使得交直流负荷都更易于接入配电网。通常交直流混合配电网中含有多个单元,如分布式发电单元、储能单元 ES(Energy Storage)、柔性互联装置等,为确保整个配电网系统安全可靠运行,对交直流混合配电网能量管控的研究具有重要意义。

目前,国内外学者对交直流混合配电网能量管控进行了一定的探索。文献[3]提出基于智能单粒子优化(ISPO)算法,通过对粒子的位置表达形式以及粒子位置更新过程的改进实现完整调度周期内复杂主动配电网优化调度策略的求解。文献[4]通过控制中心获取全局信息,采用集中式优化调度策略实现主动配电网的最优协调。理论上,在配电网系统中可以采用上述集中式的优化策略实现能量管控,但在实际的交直流混合配电系统中,交流网和直流网特性不同,处于不同的管辖范围,并且各个利益主体之间也很难实现全部信息的准确获取。此外,

交直流配电网中的数据量大,且分布广泛,随着网络规模增大,实现全局调度的难度极大增加,计算成本高。因此,分布式优化在能量管控方面具有更加广泛的实用性^[5]。

在交直流配电网分布式优化研究方面,文献[6]提出一种基于锥优化交直流混合结构的主动配电网运行优化方法。文献[7]提出交直流混合微电网优化运行方法,分别从交流供电区域和直流供电区域获取需求侧负荷参数。文献[8]对日前调度和实时调度2种时间测量手段进行协调能量管控。这种方法的局限性在于由于仅考虑用可再生分布式能源 RDG(Renewable Distributed Generation)出力对日前的储能备用容量进行安排,可能会导致对现有储能的不合理利用。文献[9]对含有大量风电的电力系统进行多时间尺度协调调度。此外,有研究利用馈线分段开关进行分区控制^[10-11]、利用多代理系统进行分层控制^[12-13]等。上述方法在配电系统中都得到了应用,但是没有充分考虑交直流配电网灵活的网络拓扑结构及较高的电能质量和能源利用率等特点。在交直流混合配电网中,1个直流区域和多个交流区域进行互联,各区域在进行区域内优化时具有独立性,在进行区域间优化时能够互相协作运行。考虑多种分布式能源并网后的优化调度是当前研究的热点,为减少可再生能源发电不确定性对配电网的影响,很多学者使用单一的优化方法,如鲁棒优化、机会约束规划、区间规划^[14-15]等。文献[16]中的分布式控制模式能够很好地适应分布式电源的分散特性,但主要存在对区域性的整体优化较差的缺陷。为解决上述问题,本文采用一致性耦合理论,以交流区域和直流区域之间的交换功率为一致性变量,提出一种各区域自治的能量协调管控方法。目前,一致性算法在电力系统中已得到一定的研究和应用。文献[17]在多智能体系统中应用一致性算

收稿日期:2019-11-04;修回日期:2020-07-23

基金项目:国家电网公司科技项目(SGSNKY00KJJS2000046);中国电机工程学会青年人才托举工程项目;四川省科技计划项目(2019YJ0631,2020YFH0040)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(SGSNKY00KJJS2000046), the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CSEE and the Science and Technology Plan Program of Sichuan Province(2019YJ0631,2020YFH0040)

法。文献[18]使用一致性算法求解电力系统经济调度问题。一致性理论已成为实现分布式控制的重要手段之一。

在上述研究的基础上,考虑可再生能源的最大出力和平稳供电,本文提出交直流混合配电网分层分布式优化体系。基于交直流之间一致性耦合理论的协调能量管控技术,使得多利益主体在考虑区域内运行特性进行独立管理的同时,在区域间进行迭代寻求整体最优调度。本文方法可提高交直流混合配电网之间的能量配送和协调优化能力。

1 交直流混合配电网结构

为满足多类型自治主体的调度要求,本文将交直流混合配电网在结构上分为区域调度层和局部调度层上、下2层,如图1所示。局部调度层对交直流区域内部RDG和ES进行出力优化,不同于传统的分区控制,局部调度层主要是面向大量的分布式电源,其自优化能力优先度要高于集中性的调度指令。区域调度层对交直流电网在边界传输的有功功率进行分解,对局部调度层的输入结果、区域调度层的可控分布式能源CDG(Controllable Distributed Generation)、上级电网购电和交直流互联的交换功率进行调度,各个区域之间建立良好的通信网络,传递需要的协调信息。在各个区域进行优化时,引入一致性约束,达到交直流混合配电网最优能量管控。

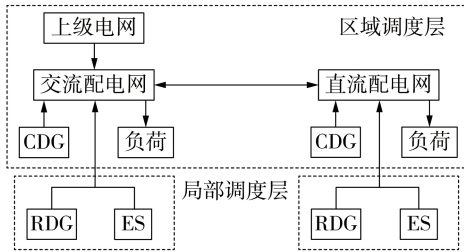


图1 交直流混合配电网结构划分

Fig.1 Division of AC/DC hybrid distribution network structure

2 局部调度层优化模型

对于局部调度层,将RDG和ES看成一个整体进行优化。由于通常RDG出力有较大的波动性,加入ES可以起到削峰填谷作用,在负荷较小时ES充电,消纳系统过剩的RDG功率,在负荷较高时ES放电,联合RDG出力,整体上可以减少RDG的等效波动性。本文对局部调度层以最大化可再生能源利用率作为优化目标,从而更充分高效地利用RDG。可以针对不同的优化主体设立不同的优化目标,根据实际情况来最优化。局部调度优化的目标函数分为两部分:第一部分考虑RDG和ES的最大发电收益,最大化可再生能源利用率;第二部分减少可再生能

源出力的波动,通过ES的作用减少RDG的出力波动,达到供电稳定的目的。优化调度模型为:

$$\max f = \alpha \sum_{t=1}^{N_T} \rho(t) P(t) - \beta \sum_{t=1}^{N_T} \left[P(t) - \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} P(t) \right]^2 \quad (1)$$

$$P(t) = P_{j,t}^{\text{RDG}} + P_{j,t}^{\text{ESd}} - P_{j,t}^{\text{ESc}} \quad (2)$$

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{RDG}} \leq P_j^{\text{RDG}, \max} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{ESc}} \leq P_j^{\text{ESc}, \max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{ESd}} \leq P_j^{\text{ESd}, \max} \quad (5)$$

$$P_{j,t}^{\text{ESc}} P_{j,t}^{\text{ESd}} = 0 \quad (6)$$

$$E_{j,t+\Delta t}^{\text{ES}} = E_{j,t}^{\text{ES}} + P_{j,t}^{\text{ESc}} \Delta t \eta_c - \frac{P_{j,t}^{\text{ESd}} \Delta t}{\eta_d} \quad (7)$$

$$E_j^{\text{ES}, \min} \leq E_{j,t}^{\text{ES}} \leq E_j^{\text{ES}, \max} \quad (8)$$

$$\left| E_{j,N_T}^{\text{ES}} - E_{j,0}^{\text{ES}} \right| \leq \varepsilon \quad (9)$$

其中, N_T 为调度时段总数; Δt 为分段间隔; α, β 为目标函数权重系数; $\rho(t)$ 为联合售电价格; $P(t)$ 为联合出力; P_j^{RDG} 和 $P_j^{\text{RDG}, \max}$ 分别为第 j 个 RDG 的发电功率和发电功率上限; P_j^{ESc} 和 $P_j^{\text{ESc}, \max}$ 分别为第 j 个 ES 的充电功率和最大充电功率; P_j^{ESd} 和 $P_j^{\text{ESd}, \max}$ 分别为第 j 个 ES 的放电功率和最大放电功率; $E_{j,t}^{\text{ES}}$ 为第 j 个 ES 在 t 时段的荷电状态; $E_{j,t+\Delta t}^{\text{ES}}$ 为第 j 个 ES 在下一时刻的荷电状态; $E_j^{\text{ES}, \max}, E_j^{\text{ES}, \min}$ 分别为荷电状态上、下限; $E_{j,0}^{\text{ES}}, E_{j,N_T}^{\text{ES}}$ 分别为 ES 在初、末时刻的荷电状态; η_c 和 η_d 分别为充、放电效率; ε 为一个充放电周期结束允许的 ES 荷电状态变化范围。

3 区域调度层优化模型

局部调度层优化结束后再从区域调度层对各配电网进行优化调度。调度的对象为 CDG 发电功率、各配电网之间的交换功率、从上级电网购电以及局部调度层上传到区域调度层的功率。

3.1 分布式优化原理

设直流区域优化变量为 $\mathbf{x}$, 交流区域优化变量为 $\mathbf{y}_i$, i 为交流区域编号(本文建模选用1个直流系统连接3个交流系统), 直流区域和交流区域分别单独考虑。

根据卡罗需-库恩-塔克 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[19], 可以分别建立优化函数。对于直流区域, 根据目标函数和约束条件建立优化函数:

$$\begin{cases} \min f^{\text{DC}}(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}^{\text{DC}}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \mathbf{h}^{\text{DC}}(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

对于交流区域, 同样根据目标函数和约束函数建立优化函数:

$$\begin{cases} \min f^{\text{AC}}(\mathbf{y}_i) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}^{\text{AC}}(\mathbf{y}_i) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3 \\ \mathbf{h}^{\text{AC}}(\mathbf{y}_i) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, f, g, h 分别为对应的目标函数、不等式约束和等式约束; x, y_i 为优化的原始变量。

在进行优化的过程中将一部分原始变量作为本区域优化变量,另一部分作为互联区域的优化变量。将原始变量分为局部变量(自身)和交换变量(参与多个区域)2类,分别分析引起自身变化调度的变量和参与交换功率的变量,使问题得以简化。直流区域与交流区域局部变量和交换变量的划分如表1所示。

表1 直流区域和交流区域原始变量的划分

Table 1 Division of original variables in DC and AC regions

区域	原始变量	局部变量	交换变量
直流区域(DC)	x	x'	z_1, z_2, z_3
交流区域 1(AC ₁)	y_1	y'_1	z_1
交流区域 2(AC ₂)	y_2	y'_2	z_2
交流区域 3(AC ₃)	y_3	y'_3	z_3

将优化变量进行分解后,式(10)、(11)可以分别表示为:

$$\begin{cases} \min f^{\text{DC}}(x', z_1, z_2, z_3) \\ \text{s.t. } g^{\text{DC}}(x', z_1, z_2, z_3) \leq 0 \\ h^{\text{DC}}(x', z_1, z_2, z_3) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \min f^{\text{AC}}(y'_i, z_i) \\ \text{s.t. } g^{\text{AC}}(y'_i, z_i) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3 \\ h^{\text{AC}}(y'_i, z_i) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由于交直流区域之间存在交换功率,其产生的交换变量使交直流混合配电网优化问题不易独立求解。为此,本文引入直流区域的优化变量 γ_i 和交流区域的优化变量 θ_i ,分别从直流区域和交流区域进行分析,使得交直流区域独立运算求解,如图2所示。上述2个变量在进行交流区域和直流区域优化时保持一致。引入变量 $c_i (i = 1, 2, 3)$, $c_i = \gamma_i - \theta_i = 0$,使得 $\gamma_i = \theta_i$ 。

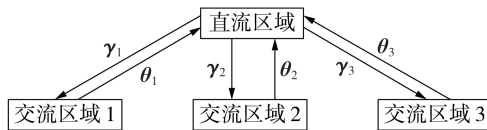


图2 一致性约束

Fig.2 Consistency constraint

3.2 交换变量建模

对于约束优化问题,将其转化为无约束优化问题可更快地求解。对于交换变量的求解问题,本文引入增广拉格朗日罚函数使其转化为无约束优化问题。

根据约束条件的特点,构造惩罚函数并引入目

标函数中,其优点是具有良好的数值特性,可减少总体计算量,当惩罚因子足够大时构造出的增广目标函数的最优值接近原始问题的最优值,相关证明可见文献[20]。

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

引入增广目标函数:

$$\begin{cases} \min f(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x) \\ P(x) = g^T(x) g(x) \end{cases} \quad (15)$$

其中, σ 为惩罚因子,取较大正值; $f(x, \sigma)$ 为罚函数; $\sigma P(x)$ 为惩罚项。

在直流区域和交流区域引入罚函数 $p(c)$, 将其代入式(12)、(13), 分别得到式(16)、(17)。

$$\begin{cases} \min f^{\text{DC}}(x', \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) + p(c_1, c_2, c_3) \\ \text{s.t. } g^{\text{DC}}(x', \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \leq 0 \\ h^{\text{DC}}(x', \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \min f^{\text{AC}}(y'_i, \theta_i) + p(c_i) \\ \text{s.t. } g^{\text{AC}}(y'_i, \theta_i) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3 \\ h^{\text{AC}}(y'_i, \theta_i) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

本文考虑目标优化函数和约束条件的情况下,使用增广拉格朗日罚函数的通用形式如式(18)所示。

$$p(c) = v^T c + w \|c\|_2^2 \quad (18)$$

$$p(c) = \sum_{i=1}^N p_i(c_i(\gamma_i, \theta_i)) = \sum_{i=1}^N v^T (\gamma_i - \theta_i) + \sum_{i=1}^N w \|\gamma_i - \theta_i\|_2^2 \quad (19)$$

其中, v 为拉格朗日乘子; w 为罚参数; $\|\cdot\|_2$ 为欧几里得范数; $c_i(\gamma_i, \theta_i) = \gamma_i - \theta_i = 0$ 为一致性约束; N 为交流区域总数; $p_i(c_i(\gamma_i, \theta_i))$ 为子问题 i 的罚函数, 定义如式(20)所示。

$$p_i(c_i(\gamma_i, \theta_i)) = v^T (\gamma_i - \theta_i) + w \|\gamma_i - \theta_i\|_2^2 \quad (20)$$

转化为类似于数学领域运筹学中的多学科设计优化 P-MDO (Problem-Multidisciplinary Design Optimization) 双层分解问题:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N [f(x, \gamma_i) + v^T (\gamma_i - \theta_i) + w \|\gamma_i - \theta_i\|_2^2] \\ \text{s.t. } g(x, \gamma_i) \leq 0 \\ h(x, \gamma_i) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

建立拉格朗日罚函数后,再对其进行分解,将 P-MDO 分解为 N 个独立的子问题。

3.3 分布式调度模型

通过 3.2 节建立优化模型以及引入罚函数,式

(12)、(13)中交换变量转换成变量 γ_i, θ_i , 同时将罚函数代入优化函数, 建立如下分布式调度模型。

直流区域:

$$\begin{cases} \min f^{\text{DC}}(\mathbf{x}', \gamma_{1,t}, \gamma_{2,t}, \gamma_{3,t}) + \\ \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^N \left[v_{i,t} (\gamma_{i,t} - \theta_{i,t}^*) + w_{i,t} \|\gamma_{i,t} - \theta_{i,t}^*\|_2^2 \right] \\ \text{s.t. } \mathbf{g}^{\text{DC}}(\mathbf{x}', \gamma_{1,t}, \gamma_{2,t}, \gamma_{3,t}) \leq 0 \\ \mathbf{h}^{\text{DC}}(\mathbf{x}', \gamma_{1,t}, \gamma_{2,t}, \gamma_{3,t}) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

交流区域 i :

$$\begin{cases} \min f^{\text{AC}}(\mathbf{y}', \theta_{i,t}) + \sum_{t=1}^{N_T} \left[v_{i,t} (\gamma_{i,t}^* - \theta_{i,t}) + w_{i,t} \|\gamma_{i,t}^* - \theta_{i,t}\|_2^2 \right] \\ \text{s.t. } \mathbf{g}^{\text{AC}}(\mathbf{y}', \theta_{i,t}) \leq 0 \\ \mathbf{h}^{\text{AC}}(\mathbf{y}', \theta_{i,t}) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

其中, $v_{i,t}, w_{i,t}$ 为直流区域与交流区域 i 优化时的参数; $\gamma_{i,t}, \theta_{i,t}$ 为直流区域和交流区域 i 功率交换的优化变量; $\gamma_{i,t}^*, \theta_{i,t}^*$ 为各自区域上一轮交换功率得到的优化值。

如图1所示, 局部调度层主要考虑RDG的最大发电水平, 区域调度层主要考虑获得最大的经济效益, 因此需要考虑发电成本和购电成本的控制。局部调度层中, 可将RDG和ES集合看作整体联合出力, 得到输出功率记为 P_c , 在区域调度层调度过程中, 将 P_c 作为输入条件, 因此不需要将其作为区域调度优化函数的变量。上级电网表示从上级输电网进行购电来补充配电网层面的发电缺额。

交直流区域的成本目标函数如下。

直流区域:

$$\min f = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{h=1}^{N_{\text{CDG, DC}}} C_{h,t}^{\text{CDG, DC}} P_{h,t}^{\text{CDG}} + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^N \delta_{\text{buy, DC}}^{\text{ACi}} P_{i,t-} - \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^N \delta_{\text{sell, DC}}^{\text{ACi}} P_{i,t+} \quad (24)$$

交流区域 i :

$$\min f = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{h=1}^{N_{\text{CDG, ACi}}} C_{h,t}^{\text{CDG, ACi}} P_{h,t}^{\text{CDG}} + \sum_{t=1}^{N_T} \delta_{\text{buy, ACi}}^{\text{DC}} P_{i,t+} - \sum_{t=1}^{N_T} \delta_{\text{sell, ACi}}^{\text{DC}} P_{i,t-} + \sum_{t=1}^{N_T} \delta_{\text{grid}}^{\text{ACi}} P_{\text{grid}}^{\text{ACi}} \quad (25)$$

其中, 上标 AC、DC 分别表示交流配电网、直流配电网参数; $N_{\text{CDG, DC}}, N_{\text{CDG, ACi}}$ 分别为直流区域和交流区域 i 的 CDG 数量; $C_{h,t}^{\text{CDG, ACi}}$ 和 $C_{h,t}^{\text{CDG, DC}}$ 分别为交流区域 i 和直流区域中第 h 个 CDG 发电成本; 假设交换功率从直流区域流向交流区域为正向, $P_{i,t+}$ 为从直流区域流向交流区域 i 的功率, $P_{i,t-}$ 为从交流区域 i 流向直流区域的功率, $P_{\text{grid}}^{\text{ACi}}$ 为交流区域 i 向上级电网购电功率(当交换功率为正向时, 直流区域看成虚拟发

电厂, 交流区域看成虚拟负荷); $\delta_{\text{buy, DC}}^{\text{ACi}}, \delta_{\text{sell, DC}}^{\text{ACi}}$ 分别为直流区域向交流区域 i 购电和售电电价; $\delta_{\text{buy, ACi}}^{\text{DC}}, \delta_{\text{sell, ACi}}^{\text{DC}}$ 分别为交流区域 i 向直流区域购电和售电电价; $\delta_{\text{grid}}^{\text{ACi}}$ 为交流区域 i 向上级电网购电电价。通过式(24)、(25)可以进一步确定交换变量:

$$\gamma_{i,t} = P_{i,t+} - P_{i,t-} = P_{i,t}^{\text{DC}} \quad (26)$$

$$\theta_{i,t} = P_{i,t-} - P_{i,t+} = P_{i,t}^{\text{AC}} \quad (27)$$

其中, $P_{i,t}^{\text{DC}}$ 为直流区域与交流区域 i 的交换功率; $P_{i,t}^{\text{AC}}$ 为交流区域 i 与直流区域的交换功率。

在区域调度层, 系统在进行优化调度的同时必须满足一定的约束条件, 包括互联系统中的功率平衡、交直流电压幅值约束、各发电单元功率输出限制、ES容量约束、CDG出力上下限约束、从上级电网购电的上限约束、VSC允许通过的载流量上下限约束、VSC基波相电压幅值上下限约束, 此处不再详述。

3.4 计算流程

在本文中, 将整个交直流混合配电网在结构上分为局部调度和区域调度2层。在求解调度中, 先进行局部调度层的优化求解, 再进行区域调度层的优化求解。根据前文采用局部调度优化约束条件, 随着负荷要求变化, 可得到局部调度层的最佳出力功率 P_c , 将该功率传输到区域调度层作为输入条件进行调度。区域调度层中, 在基于一致性耦合关联的前提下, 采用分布式优化调度对各直流区域、交流区域进行调度优化, 双层循环迭代求解得到能量管控结果。

双层循环求解从内层开始, 在内层求解中, 保持目标函数中的一致性约束罚函数权重系数不变, 对交直流混合配电网优化调度问题, 按照从交流配电网区域到直流配电网区域再到交流配电网的顺序循环交替求解, 在达到内层循环收敛后, 进行外层循环求解; 在外层循环求解中, 更新目标函数中的一致性约束罚函数权重系数, 再次循环到内层循环求解, 直到外层循环收敛, 结束流程并输出结果。

对交直流配电网进行求解的具体步骤如下。

(1) 参数初始化。内层迭代次数 $K_1=0$, 外层迭代次数 $K_0=0$, 设置 $\gamma_{i,t}^{K_1}, \theta_{i,t}^{K_1}, v_{i,t}^{K_0}, w_{i,t}^{K_0}$ 初值。

(2) 内层迭代。交流配电网优化, 令 $\gamma_{i,t}^{K_0} = \gamma_{i,t}^{K_1}$, 对交流配电网模型进行优化求解, 得到解 $\theta_{i,t}^{K_1+1}$ 。

(3) 内层迭代。直流配电网优化, 令 $\theta_{i,t}^{K_0} = \theta_{i,t}^{K_1+1}$, 对直流配电网模型进行优化求解, 得到解 $\gamma_{i,t}^{K_1+1}$ 。

(4) 检查内层循环是否收敛。若满足式(28)所示收敛判据, 则转至步骤(5); 否则, 令 $K_1 = K_1 + 1$, 转至步骤(2)。

$$\begin{cases} \left| \gamma_{i,t}^{K_1} - \gamma_{i,t}^{K_1+1} \right| \leq \varepsilon_1 \\ \left| \theta_{i,t}^{K_1} - \theta_{i,t}^{K_1+1} \right| \leq \varepsilon_1 \end{cases} \quad (28)$$

(5)检查外层是否收敛。若满足式(29)所示收敛判据,则输出结果,算法结束;否则,令 $K_0 = K_0 + 1$,转至步骤(6)。

$$|\gamma_{i,t}^{K_1} - \theta_{i,t}^{K_1}| \leq \varepsilon_2 \quad (29)$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为交直流区域内部和交直流区域之间功率迭代计算结果收敛判据。求解流程图见附录A。

(6)更新惩罚系数 $v_{i,t}^{K_0}, w_{i,t}^{K_0}$,令 $K_1 = 0, \gamma_{i,t}^{K_1} = \gamma_{i,t}^{K_0+1*}$,转至步骤(2)。

4 算例分析

本节对前文构建的交直流混合配电网进行算例模拟,验证所提出的分布式优化调度策略的有效性。通过MATLAB采用Yalmip编程并调用CPLEX求解器。调度时段为一天的00:00—24:00。

本文算例网络中共有3个交流配电网,其拓扑结构类似,以交流区域1为例绘制节点配电网图,如图3所示。交流配电网中的节点分别连接上级电网、通过柔性直流换流站连接直流配电网、连接2个CDG,以及连接RDG和ES组成的联合出力单元。交流区域2、3的拓扑结构类似,区别在于节点连接的位置不同。

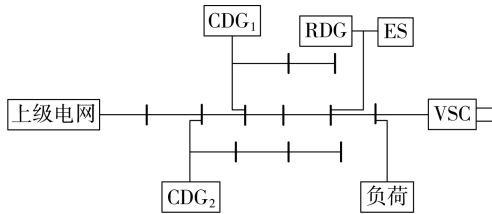


图3 交流区域1结构示意图

Fig.3 Structure diagram of AC Area 1

直流区域结构示意图如图4所示,包含2个CDG以及RDG和ES组成的联合出力单元,通过不同位置的3座换流站和交流配电网相接。目前的直流配电网结构相对比较简单,本文将该区域简化成不同机组之间的功率守恒问题,与交流配电网相比,直流配电网在能量输送和电能损耗方面的性能更好。

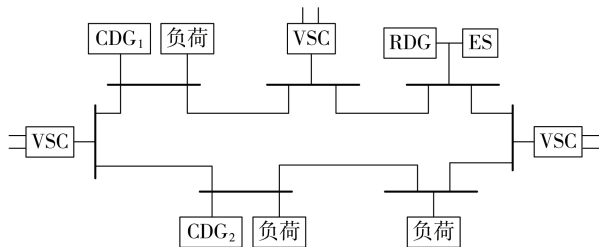


图4 直流区域结构示意图

Fig.4 Structure diagram of DC area

4.1 局部调度层优化调度结果

在本文中,将局部调度层中的RDG设为风力发

电机,通过对24 h的风力大小进行预测,再根据公式计算风机叶片转速,由风电机的发电机出力特性公式求得发电功率。根据夜间属于用电低谷期、日间属于用电高峰期的特点,制定RDG和ES联合售电价格:00:00—08:00时段电价为0.2元/(kW·h);其余时段电价为0.5元/(kW·h)。目标函数的权重系数值设定为 $\alpha = 1, \beta = 0.001$ 。

以直流区域内的局部调度层优化为例进行说明,如图5所示(图中ES功率为正值表示放电,为负值表示充电)。为充分利用可再生能源发电,设定风电机组每时段按照最大出力进行发电。充分发挥ES对风力发电的调节能力,使负荷高峰期ES和风电机组同时对负荷进行供电,负荷低谷期ES对风电机组所发电能进行存储,这样既满足了用户需求,也获得了最大经济效益,而且ES的使用也平抑了RDG出力的大幅度波动,系统整体出力表现较平滑,提高了供电稳定性。

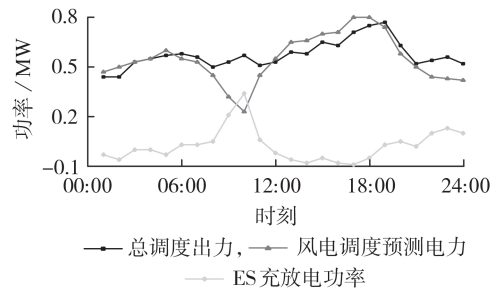


图5 直流区域局部调度优化结果

Fig.5 Results of local dispatching optimization of DC area

4.2 区域调度层优化调度结果

在进行交直流配电网之间的区域调度优化时,假设CDG是微型燃气轮机。交流和直流区域中各CDG的发电费用、各配电网区域购电费用见附录B。各区域各类负荷日功率曲线见附录C。

采用目标级联分析法进行迭代求解,验证其在求解交直流配电网双层协调模型中的适用性。在迭代过程中,随着权重系数和交换变量值的不断更新,一致性约束的作用逐渐显现,这是由于分布式优化的逐渐收敛,使得交换变量优化结果逐渐收敛于交流区域和直流区域中的交换功率。设定共享变量初值 $\gamma_{i,t}^0 = \theta_{i,t}^0 = 0$,一致性约束惩罚函数系数 $v = 0$,权重初值 $w_{i,t}^0 = 0.1$,权重增速本文中取为2。同时设定收敛判据为 $\varepsilon_1 = 0.01, \varepsilon_2 = 0.1$ 。

将分布式优化和集中式优化结果进行对比,结果见表2。表中, $C_T, C_A, C_{buy}, C_D, C_{sell}$ 分别为向上级电网购电成本、交流配电网发电成本与购电成本、直流配电网发电成本与售电收益。由表中可见,2种模式下总成本分别为307970.3元和307957.5元,几乎一致,表明了本文所提方法的有效性。

表2 计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results

单位:元

模式	C_T	C_A	C_{buy}	C_D	C_{sell}
集中式	220 696.5	38 200	20 698.7	28 375.1	20 698.7
分布式	220 667.7	38 200	20 703.2	28 386.6	20 703.2

分布式调度优化过程中,每个配电网区域考虑自身出力达到最优经济供电,同时追求可再生能源的最大供电;此外,需要考虑其他互联区域配电网优化指令,进行一定额度的交换功率配比。迭代求解的过程就是每个配电网区域在考虑自身调度优化达到经济最优和区域整体需求之间进行折中的过程,达到整个交直流配电网系统整体的最优调度。上述博弈过程和有效迭代能够使分布式优化获得更加精确合理的解,从而使得交直流系统达到调度平衡。

在调度周期内,各交直流区域的交换功率情况如图6所示,具体交换功率值见附录D。根据前文定义,交换功率的方向设定为从直流区域输送至交流区域为正,从交流区域输送至直流区域为负。

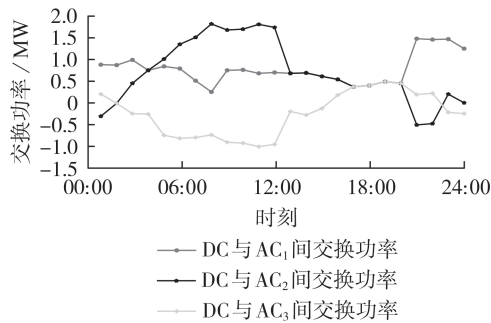


图6 各交流区域和直流区域的交换功率

Fig.6 Exchanged power between each AC area and DC area

进行区域调度优化后,在一天24 h的调度周期中,交流和直流配电网区域CDG发电的运行情况见附录E。由CDG的运行状态和附录B中CDG的发电费用以及从上级电网购电费用可知:在一天的大部分时间中,燃气轮机发电成本低于从上级电网购电成本,此时,在交直流互联系统中优先使用燃气轮机产生的电能,电量缺额从上级电网购买;在燃气轮机发电成本高于从上级电网购电成本的时段,燃气轮机停止运行,此时系统中的电量缺额从上级电网购买来达到系统的供电平衡。

通过构建的交直流混合配电网,可以根据各区域的不同负荷特性进行更好的调度。由图6可见:在负荷量较大的交流区域1,直流区域的能量可以输送至该区域,补偿其能量供应;在交流区域2负荷量较大的02:00—24:00时段,传输至直流区域的能量可以传输至交流区域2补偿其能量供应;在交流区域3负荷量较小的时段,该区域生产的电能可以

经由直流配电网传输供给直流区域负荷,或继续传输并补偿其他负荷较大的交流区域。

基于一致性耦合理论进行优化调度的交直流区域结果如图7、8及附录F所示。通过交换功率参与交直流区域间的电能调度,直流配电网中的分布式能源在直流区域满足自身负荷需求的前提下为各个交流区域提供一部分能源供应,同时也可以作为交流区域之间能源传输的中介,有利于提高经济性以及对可再生能源的接纳能力。

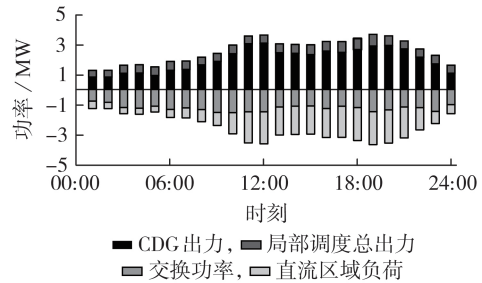


图7 直流区域调度平衡

Fig.7 Dispatch balance of DC area

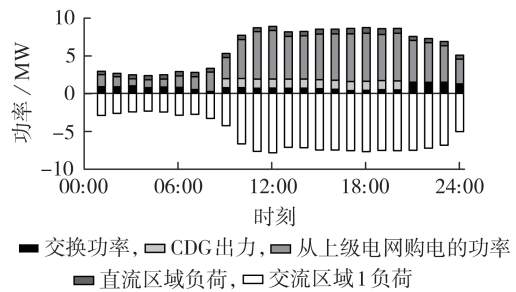


图8 交流区域1调度平衡

Fig.8 Dispatch balance of AC Area 1

5 结论

本文提出交直流混合配电网的分布式调度优化策略,从而达到多种能源并入交直流配电网的能量协调管控,实现多源协同运行优化。主要结论如下。

(1)本文方法能够最大化可再生能源利用率,同时通过利用ES降低其出力波动对配电网的影响。

(2)基于一致性耦合思想构建交直流混合配电网能量管控体系,采用目标级联分析技术实现不同层级间交换功率的求解,该算法具有快速收敛特性。相较于集中式优化,分布式优化既实现了不同调度层的独立优化,又能够协调不同的发电资源,满足多类型自治主体的调度需求。

本文所提方法局限于交直流配电网具有自主调度管理功能场景,在未来更加复杂的交直流调度关系下,构建何种交直流混合配电网协调能量管控体系值得进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] 黄仁乐,程林,李洪涛. 交直流混合主动配电网关键技术研究[J]. 电力建设,2015,36(1):46-51.
HUANG Renle, CHENG Lin, LI Hongtao. Research on key technology of AC/DC hybrid active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 46-51.
- [3] 尤毅,刘东,钟清,等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):177-183.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [4] DOLAN M J, DAVIDSON E M, KOCKAR I, et al. Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 790-799.
- [5] 夏世威,张茜,余璟,等. 基于一致性理论的多区域电力系统分布式状态估计[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):140-147.
XIA Shiwei, ZHANG Qian, YU Jing, et al. Distributed state estimation of multi-area power systems based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 140-147.
- [6] 王成山,冀浩然,李鹏,等. 基于锥优化的交直流混合结构有源配电网运行优化方法:CN105119280A[P]. 2015-12-02.
- [7] 何红玉,韩蓓,徐晨博,等. 交直流混合微电网一致性协调优化管理系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):138-146.
HE Hongyu, HAN Bei, XU Chenbo, et al. Optimal management system of hybrid AC/DC microgrid based on consensus protocols[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 138-146.
- [8] 王魁,张步涵,闫大威,等. 含大规模风电的电力系统多时间尺度滚动协调调度方法研究[J]. 电网技术,2014,38(9):2434-2440.
WANG Kui, ZHANG Buhuan, YAN Dawei, et al. A multi-time scale rolling coordination scheduling method for power grid integrated with large scale wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2434-2440.
- [9] LIU Y, GAO H, LIU J, et al. Multi-agent based hierarchical power scheduling strategy for active distribution network[C]//2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies(EDST). Vienna, Austria: IEEE, 2015: 151-158.
- [10] 于汀,刘广一,蒲天骄,等. 计及柔性负荷的主动配电网多源协调优化控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):95-100.
YU Ting, LIU Guangyi, PU Tianjiao, et al. Multiple coordinated optimization control of active distribution network considering flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 95-100.
- [11] 刘东,陈云辉,黄玉辉,等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5500-5506.
LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5500-5506.
- [12] 蒲天骄,李烨,陈乃仕,等. 基于MAS的主动配电网多源协调优化调度[J]. 电工技术学报,2015,30(23):67-75.
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network based on multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 67-75.
- [13] 蒲天骄,刘克文,李烨,等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报,2015,35(8):1864-1874.
PU Tianjiao, LIU Kewen, LI Ye, et al. Multi-agent system based simulation verification for autonomy-cooperative optimization control on active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1864-1874.
- [14] 张放,刘继春,高红均,等. 基于风电不确定性的电力系统备用容量获取[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(13):14-19.
ZHANG Fang, LIU Jichun, GAO Hongjun, et al. Reserve capacity model based on the uncertainty of wind power in the power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 14-19.
- [15] WANG Y, XIA Q, KANG C Q. Unit commitment with volatile node injections by using interval optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1705-1713.
- [16] ZHAO J H, WANG C S, ZHAO B, et al. A review of active management for distribution networks: current status and future development trends[J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42: 280-293.
- [17] 谢俊,陈凯旋,岳东,等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):112-117.
XIE Jun, CHEN Kaixuan, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 112-117.
- [18] ZHANG Ziang, YING Xichun, CHOW M Y. Decentralizing the economic dispatch problem using a two-level incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment[C]//Proceedings of 2011 North American Power Symposium. Boston, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [19] 符杨,张智泉,李振坤,等. 基于二阶段鲁棒博弈模型的微电网群及混合交直流配电系统协调能量管理策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(4):1226-1240.
FU Yang, ZHANG Zhiquan, LI Zhenkun, et al. A two-stage robust game approach for coordinated energy management in hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1226-1240.
- [20] TOSSERAMS S, ETMAN L F P, PAPALAMBROS P Y, et al. An augmented Lagrangian relaxation for analytical target cascading using the alternating direction method of multipliers[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 31(3): 176-189.

作者简介:



张凡

张凡(1995—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为交直流混合配电网经济运行(E-mail:1341934500@qq.com);

高红均(1989—),男,重庆人,副教授,博士,通信作者,研究方向为不确定优化在电力系统中的应用(E-mail: e-gaohongjun@163.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第116页 continued on age 116)

Surrogate model based operation mode of distributed energy spot market

CHEN Xinhe^{1,2}, PEI Wei^{1,2}, DENG Wei^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: How to maximize the benefits of multiple participants in distributed energy spot market under information asymmetry environment is an urgent problem to be solved. A novel operation mode of distributed energy spot market based on surrogate model is proposed, and a modeling method of data-driven day-ahead market surrogate model is also proposed. The mapping model between the clearing electricity price curve of distributed energy spot market and the optimal tie-line power curve of each market participant and its daily electricity cost is obtained without exposing the physical model information. Further, a multi-objective optimization model for clearing the distributed energy spot market is built based on the surrogate model, on this basis, the operators of distributed energy spot market can scientifically and fairly maximize the economic benefits of each market participant. The case comparison with the centralized scheduling operation mode based on physical model and the centralized bidding and clearing mode based on piecewise quotation verifies the feasibility and effectiveness of the proposed spot market operation mode and the modeling method of surrogate model.

Key words: distributed energy; microgrid; spot market; surrogate model; data driven

(上接第29页 continued from page 29)

Energy coordinated management of AC/DC hybrid distribution network based on consistent coupling association

ZHANG Fan¹, GAO Hongjun¹, LI Haibo², LIU Youbo¹, LIU Junyong¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610042, China)

Abstract: AC/DC hybrid distribution network is an important form of future power grid, and its energy management research is of great significance. A local and regional bi-layer scheduling model is built for AC/DC hybrid distribution network with multiple sources, and a distributed scheduling optimization strategy is proposed. In the local dispatching layer, the joint output of renewable distributed energy and energy storage equipment are considered to ensure stable supply of load, and the optimal dispatching results are transmitted to the regional dispatching layer. In the regional dispatching layer, independent optimization is carried out for AC and DC regions respectively, the autonomous operation characteristics of each region are fully considered, the operation constraints of AC/DC hybrid distribution network are satisfied, and a distributed energy management method based on consistency theory is proposed to obtain the optimal feasible solution. Case results verify the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: AC/DC hybrid distribution network; energy management; consistency constraint; distributed optimization

附录 A:

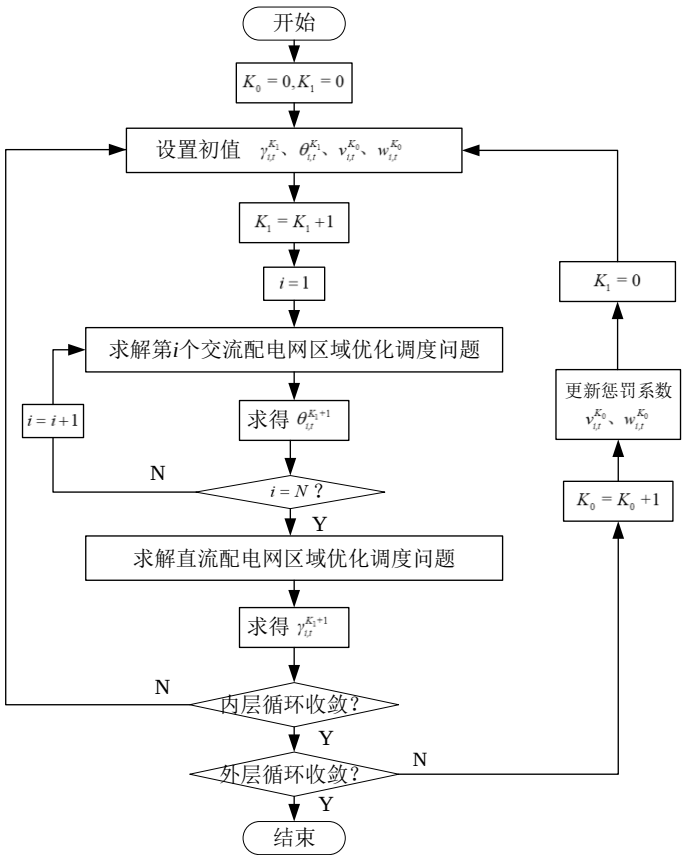


图 A1 区域调度层分布式优化调度求解流程

Fig.A1Solving flowchart of distributed optimal scheduling at regional dispatching layer

附录 B:

表 B1 各配电网区域 CDG 发电费用

Table B1 CDG power generation expense of each distribution network area

配电网区域	CDG ₁ 发电费用/	CDG ₂ 发电费用/
	[元•(kW•h) ⁻¹]	[元•(kW•h) ⁻¹]
DC	0.3	0.3
AC ₁	0.8	0.8
AC ₂	0.6	0.85
AC ₃	0.35	0.5

表 B2 各配电网区域购电电价

Table B2 Electricity purchasing price in each distribution network area

购电行为	电价/[元•(kW•h) ⁻¹]
DC 向 AC ₁ 购电	0.8
DC 向 AC ₂ 购电	0.7
DC 向 AC ₃ 购电	0.4
交流各区域向 DC 购电	0.7

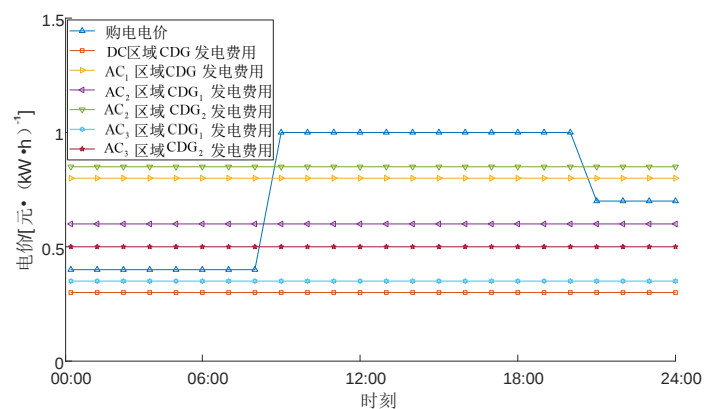


图 B1 各类型电源电价曲线
Fig.B1 Electricity price curves of each type of power source

附录 C:

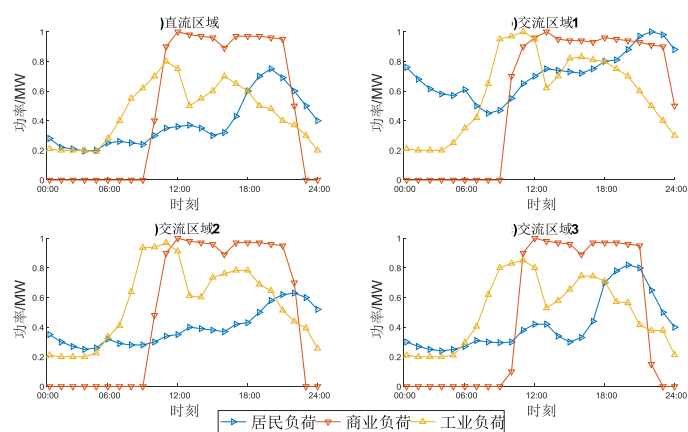


图 C1 各类负荷日功率曲线
Fig.C1 Daily power curves of various loads

附录 D:

表 D1 交直流区域交换功率
Table D1 exchange power between AC and DC area

调度时段	交换功率/MW			调度时段	交流功率/MW		
	DC-AC ₁	DC-AC ₂	DC-AC ₃		DC-AC ₁	DC-AC ₂	DC-AC ₃
1	0.880	-0.310	0.200	13	0.680	0.680	-0.200
2	0.870	-0.012	-0.012	14	0.690	0.690	-0.280
3	0.990	0.450	-0.250	15	0.610	0.610	-0.130
4	0.750	0.750	-0.260	16	0.540	0.540	0.180
5	0.840	1.010	-0.750	17	0.370	0.370	0.370
6	0.790	1.350	-0.820	18	0.400	0.400	0.400
7	0.510	1.510	-0.800	19	0.490	0.490	0.490
8	0.250	1.820	-0.740	20	0.450	0.450	0.450
9	0.750	1.680	-0.910	21	1.480	-0.510	0.190
10	0.760	1.700	-0.930	22	1.460	-0.480	0.220
11	0.680	1.810	-1.010	23	1.470	0.200	-0.220
12	0.700	1.740	-0.960	24	1.250	0	-0.250

附录 E:

表 E1 CDG 运行状态
Table E1 CDG running state

区域	CDG	运行状态																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
直流区域	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
交流区域1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
交流区域2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
交流区域3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注：表头中数字表示调度时段；表身中“1”表示 CDG 在该时段处于开机运行状态，“0”表示 CDG 在该时段处于停机状态。

附录 F:

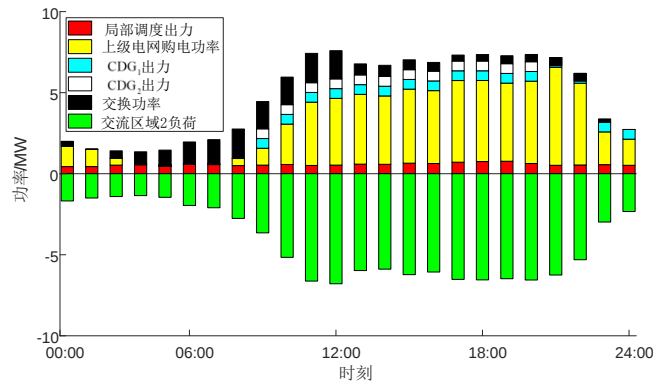


图 F1 交流区域 2 调度平衡
Fig.F1 Dispatch balance of AC area 2

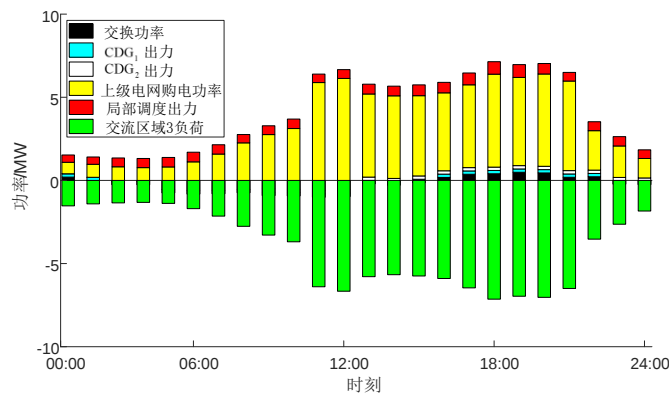


图 F2 交流区域 3 调度平衡
Fig.F2 Dispatch balance of AC area 3