

# 基于成本最优的含储热光热电站与火电机组 联合出力日前调度

崔 杨<sup>1</sup>, 杨志文<sup>1</sup>, 仲悟之<sup>2</sup>, 赵钰婷<sup>1</sup>, 叶小晖<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:**含储热光热发电的优势体现为良好的出力可控性和可调度性,合理调度光热发电能够有效降低系统运行成本。以成本最优为目标,从光热电站的光电转换特性分析角度出发,在计及各项运行约束的基础上,提出含储热光热电站与火电机组联合出力调度策略。该策略综合考虑火电机组发电成本、光热发电并网消纳的环境效益和运行维护成本、系统旋转备用成本以及电网安全运行约束等因素,从而确定光热电站在既定储热容量下的最优出力调度策略。基于遗传算法,通过 IEEE 30 节点算例验证了所提方法的可行性与有效性。

**关键词:**成本最优;储热电站;光热电站;火电机组;调度策略

**中图分类号:**TM 73

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.011

## 0 引言

目前大规模利用太阳能的方式有光伏 PV (Photo-Voltaic) 发电和光热 CSP (Concentrating Solar Power) 发电。相较于 PV 发电而言, CSP 发电起步较晚, 发展较缓慢, 但随着经济和科技的不断发展, CSP 发电的规模不断扩大。根据世界能源署预计, 2025 年全世界 CSP 装机容量将达到 22 GW, 2050 年全世界 CSP 发电量将占至全球总发电量的 11.3%<sup>[1]</sup>。大规模 CSP 发电联网运行的相关课题受到众多学者们的关注<sup>[2]</sup>。

受太阳能固有资源属性的影响, CSP 发电具有间歇性与不确定性, 大规模 CSP 发电并网会威胁电网运行的安全性和经济性<sup>[3-5]</sup>。含储热 CSP 电站能够对热能进行存储, 实现出力可调节、可控制, 进而能够在保证 CSP 发电联网安全运行的基础上实现综合成本最优的目标。良好的可控性和可调度性使得 CSP 发电的大规模并网消纳成为可能, 此外, 据国家发改委《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究》, 到 2050 年, 风电、PV 发电、CSP 发电等可再生能源电源将供应 60% 以上的一次能源消费。目前, 我国已经在青海、甘肃等太阳能资源丰富的地区实现了 CSP 发电与火电机组的联合并网运行。如何在兼顾联网运行安全性与经济性的基础上合理调度 CSP 发电, 成为我国 CSP 发电大规模发展及并网消纳面临的重要问题。

目前, 围绕 CSP 电站出力调度问题的解决方案

大多以国外研究为主<sup>[6-14]</sup>, 国内研究尚处起步阶段<sup>[15]</sup>。文献[6]通过对 CSP 电站动态模型的相关研究, 提出具有实时性的优化控制方法。文献[7-8]表明, 在 CSP 电站运行的过程中, 可以通过控制储热系统、热力循环系统等内部环节提高电站的运行经济性。文献[9]基于市场价格, 以市场收益最大化为目标, 对 CSP 电站的最优运行策略进行研究。文献[10-11]对比了 PV 发电和 CSP 发电的技术性与经济性, 研究表明 CSP 发电在可控性方面优势突出, 通过合理调度出力, 可以有效降低运行成本。文献[12]以运行经济性最优为目标, 探究了 CSP 电站出力可调度性带来的经济效益。文献[13]详细分析了影响 CSP 电站价值的各项因素, 探究了储热系统对 CSP 电站运行特性与并网经济性的影响。文献[14]建立了综合考虑风光特性的组合模型, 详细阐述了 CSP 电站的各项效益, 表明 CSP 发电通过合理地并网消纳能够产生显著的经济效益。文献[15]以完全消纳 CSP 发电为前提, 通过仿真表明, 合理的出力调度能够降低 CSP 电站的运行成本, 提高上网率, 产生较大的环境收益。

综上, 国内外学者们对 CSP 发电可调度性的经济效益进行了较为广泛的研究, 但是基于既定储热容量 CSP 电站并网成本进行出力调度策略的相关研究较少。我国太阳能资源丰富的地区已经实现了 CSP 发电的联网运行, 如何获得并网运行的最佳经济性成为 CSP 发电大规模并网消纳前必须解决的问题。为此, 本文综合考虑火电机组发电成本、CSP 发电的环境效益和运行维护成本、系统旋转备用成本以及电网的安全运行约束等因素, 提出含储热 CSP 电站与火电机组经济最优的联合出力调度策略。

## 1 CSP 电站的光电转换特性

目前国内外在建的 CSP 电站基本由光场、储热

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51777027); 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目 (JJKH20170099KJ)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51777027) and the “13th Five-year” Scientific Research Planning Project of Jilin Province Department of Education (JJKH20170099KJ)

系统和热力循环三部分组成,各组成部分之间由传热流体进行能量传递。主要工作过程如下:CSP 电站利用集热装置吸收太阳能,将其转化为热能,通过传热流体将热能传递到热力循环系统,进而产生蒸汽推动汽轮机得到电能,实现光-热-电的转化过程;同时,热能可以通过传热流体储存至储热系统,根据调度需求放热发电。CSP 发电与其他新能源发电具有明显的区别,主要体现在配置了储热系统,能够对光-热-电的转换过程进行控制,进而调节发电出力。

CSP 电站通过集热装置将镜场反射的光能转化为热能,得到的热功率为<sup>[15]</sup>:

$$P_t^{\text{csp},r} = \eta_1 S D_t \quad (1)$$

其中, $P_t^{\text{csp},r}$  为集热装置在时段  $t$  的热功率; $\eta_1$  为光热转换效率; $S$  为 CSP 电站的镜场面积; $D_t$  为光照在时段  $t$  的直接辐射指数(DNI)。

通过集热装置转化得到的热量在有负荷需求时直接用于发电,在负荷较低时储存至储热系统,用于负荷高峰期放热发电<sup>[16-17]</sup>,其满足:

$$P_t^{\text{csp},r} = P_t^{\text{sf},r} + P_t^{\text{HT}} \quad (2)$$

其中, $P_t^{\text{sf},r}$  为时段  $t$  由集热装置直接用来发电的热功率; $P_t^{\text{HT}}$  为时段  $t$  集热装置向储热系统传递的热功率。

在储热及放热过程中都存在热量损失,储放热特性表示为:

$$P_t^{\text{TS},c} = \eta_c P_t^{\text{HT}} \quad (3)$$

$$P_t^{\text{TS},f} = \frac{P_t^{\text{TH}}}{\eta_f} \quad (4)$$

其中, $P_t^{\text{TS},c}$  为储热装置在时段  $t$  的储热功率; $P_t^{\text{TS},f}$  为储热装置在时段  $t$  的放热功率; $P_t^{\text{TH}}$  为储热系统在时段  $t$  向传热流体传递的热能; $\eta_c$  为储热系统的充热损失率; $\eta_f$  为储热系统的放热损失率。

储热系统在热能存储期间将产生热能损耗,热能损耗的计算公式如下:

$$C_t^{\text{TS},r} = (1 - \eta_s \Delta t) C_{t-1}^{\text{TS},r} + (P_t^{\text{TS},c} - P_t^{\text{TS},f}) \Delta t \quad (5)$$

其中, $C_t^{\text{TS},r}$  为储热系统在时段  $t$  的储热量; $\eta_s$  为储热系统的热耗散系数; $\Delta t$  为时间间隔。

CSP 电站的输出功率由集热装置与储热系统的热功率共同决定,因此,CSP 电站的发电功率为:

$$\begin{cases} P_t^{\text{csp},d} = \eta_d \left( P_t^{\text{csp},r} - \frac{P_t^{\text{TS},c}}{\eta_c} + P_t^{\text{TS},f} \eta_f \right) \\ P_t^{\text{TS},c} P_t^{\text{TS},f} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_t^{\text{csp},d}$  为 CSP 电站在时段  $t$  的输出电功率; $\eta_d$  为热电转换效率。储热、放热功率的乘积为 0 表示储热、放热过程不能同时进行。

## 2 含储热 CSP 电站出力调度成本模型

本文综合考虑火电机组发电成本、CSP 发电并网消纳的环境效益和运行维护成本、系统旋转备用成本,建立了 CSP 电站与火电机组经济最优的联合出力调度模型,具体公式如下:

$$E = \min(E_1 - E_2 + E_3 + E_4) \quad (7)$$

其中, $E$  为 CSP 电站联网运行时的综合成本; $E_1$  为火电机组的发电成本; $E_2$  为 CSP 电站环境效益; $E_3$  为系统旋转备用成本; $E_4$  为 CSP 电站的运行维护成本。

(1) 火电机组发电成本  $E_1$ 。

CSP 电站并网会对电网的运行造成较大的影响,为满足调度需求会改变火电机组的出力大小和启停计划。火电机组的发电成本包括机组的燃料成本和启停成本,计算公式为:

$$E_1 = e_1(P_{kt}) + e_2(u_{kt}) \quad (8)$$

其中, $e_1$  为火电机组的燃料成本; $e_2$  为火电机组的启停成本; $P_{kt}$  为火电机组  $k$  在时段  $t$  的发电功率; $u_{kt}$  为机组  $k$  在时段  $t$  的运行状态, $u_{kt} = 1$  表示机组处于运行状态, $u_{kt} = 0$  表示机组处于停机状态。

$e_1, e_2$  的计算公式分别如下:

$$e_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n (a_k P_{kt}^2 + b_k P_{kt} + c_k) \quad (9)$$

$$e_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n [u_{kt}(1 - u_{k(t-1)}) S_k] \quad (10)$$

其中, $S_k$  为机组  $k$  的启动成本; $a_k, b_k, c_k$  为机组  $k$  的燃料成本系数; $T$  为时段总数; $n$  为火电机组总数。

(2) CSP 电站环境效益  $E_2$ 。

CSP 电站并网会降低火电机组的发电量,减小煤耗,从而有效降低污染物的排放量,达到环境保护的目的,此时会产生一定环境效益,其计算公式为:

$$E_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T k_G P_{iGt} \quad (11)$$

其中, $P_{iGt}$  为 CSP 电站  $i$  在时段  $t$  的输出功率; $k_G$  为 CSP 电站并网后的环境效益系数; $m$  为并网 CSP 电站的数量。

(3) 系统旋转备用成本  $E_3$ 。

为保证电力系统安全运行,需预留一定的备用容量来应对负荷预测误差以及突发事件,系统备用容量需要一定的成本费用。由于 CSP 发电具有一定的随机性,将会造成备用成本增加,此时系统备用成本可表示为:

$$E_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n (\alpha_k U_{kt} + \beta_k D_{kt} + \gamma_k R_{kt}) \quad (12)$$

其中, $U_{kt}, D_{kt}, R_{kt}$  分别为机组  $k$  在时段  $t$  的正、负旋转备用和事故备用容量; $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$  分别为机组  $k$  的正、负旋转备用和事故备用成本系数。

(4) CSP 电站的运行维护成本  $E_4$ 。

由于 CSP 电站在运行过程中需要一些必要的保温设备以及维护措施,因此其在发电的同时会产生一定的运行维护成本,计算公式如下:

$$E_4 = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T (k_{is} P_{it}^{SF,d} + k_{iTs} P_{it}^{TS,df}) \quad (13)$$

其中,  $k_{is}$  为 CSP 电站  $i$  由集热装置提供热能发电的成本系数;  $k_{iTs}$  为 CSP 电站  $i$  由储热装置提供热能发电的成本系数;  $P_{it}^{SF,d}$  为 CSP 电站  $i$  在时段  $t$  由集热装置提供热能的发电功率;  $P_{it}^{TS,df}$  为 CSP 电站  $i$  在时段  $t$  由储热装置提供热能的发电功率。

集热装置提供热能的发电功率  $P_{it}^{SF,d}$  为:

$$P_{it}^{SF,d} = \eta_d P_{it}^{SF,r} \quad (14)$$

储热系统提供热能的发电功率  $P_{it}^{TS,df}$  为:

$$P_{it}^{TS,df} = (1 - \eta_f) \eta_d P_{it}^{TS,f} \quad (15)$$

### 3 系统运行约束

CSP 电站并网过程中要充分考虑电网的安全性与可靠性,同时又要兼顾火电机组与 CSP 电站的出力、爬坡等限制<sup>[18-19]</sup>。本文主要考虑以下的约束。

(1) 电网功率平衡约束。

忽略网络损耗,火电机组与 CSP 电站输出功率之和与负荷功率平衡,即:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n P_{kt} + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T P_{iGt} - \sum_{t=1}^T P_{Lt} = 0 \quad (16)$$

其中,  $P_{Lt}$  为在时段  $t$  的负荷功率。

(2) 火电机组相关约束。

a. 电网运行时的正、负旋转备用容量约束为:

$$\begin{cases} U_k = \sum_{k=1}^n \min(P_{kmax} - P_k, r_{uk}) \geq P_{Lt} L \\ D_k = \sum_{k=1}^n \min(P_k - P_{kmin}, r_{dk}) \geq P_{Lt} L \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $U_k$ 、 $D_k$  分别为火电机组  $k$  的正、负旋转备用容量;  $P_{kmax}$ 、 $P_{kmin}$  分别为火电机组  $k$  的最大、最小出力;  $r_{uk}$ 、 $r_{dk}$  分别为机组  $k$  的最大向上、向下爬坡率;  $L$  为负荷预测误差率。

b. 火电机组出力约束:

$$P_{kmin} \leq P_{kt} \leq P_{kmax} \quad (18)$$

c. 火电机组爬坡率约束:

$$-r_{dk} \leq P_{kt} - P_{k(t-1)} \leq r_{uk} \quad (19)$$

d. 火电机组启动和停运时的出力约束。

火电机组从停运到运行状态,或从运行到停运状态时,在该时段的出力为最小稳定运行出力,具体如下:

$$P_{kt} = P_{kmin} \quad \begin{cases} u_{k(t-1)} = 0, u_{kt} = 1 \text{ 或} \\ u_{kt} = 1, u_{k(t+1)} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

(3) CSP 电站储热系统的相关约束。

a. 储热容量约束。

储热系统在运行过程中需要维持一定的最低温度以保证储热熔盐的熔融状态,因此,储热系统的储热容量约束为:

$$C_{min}^{TS,r} \leq C_t^{TS,r} \leq C_{max}^{TS,r} \quad (21)$$

其中,  $C_{max}^{TS,r}$ 、 $C_{min}^{TS,r}$  分别为储热系统的储热上、下限。

b. 储热系统的储热、放热功率约束为:

$$\begin{cases} P_{min}^{TS,c} \leq P_t^{TS,c} \leq P_{max}^{TS,c} \\ P_{min}^{TS,f} \leq P_t^{TS,f} \leq P_{max}^{TS,f} \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $P_{min}^{TS,c}$ 、 $P_{min}^{TS,f}$  分别为储热系统储、放热功率的下限;  $P_{max}^{TS,c}$ 、 $P_{max}^{TS,f}$  分别为储热系统储、放热功率的上限。

c. 同一时段储热、放热约束。

同一时段,储热与放热不能同时进行,即:

$$P_t^{TS,c} P_t^{TS,f} = 0 \quad (23)$$

d. 储热系统始末储热量约束。

为满足下一个调度时段的需求,储热系统在一个调度周期始末储热量保持不变。

$$C_{t0}^{TS,r} = C_T^{TS,r} \quad (24)$$

其中,  $C_{t0}^{TS,r}$ 、 $C_T^{TS,r}$  分别为调度周期内储热系统储热量的初始值与结束值。

e. 储热系统储热量约束。

储热系统在储热期间会产生一定的损耗,因此储热系统的储热量由储放热功率与热能损耗量共同决定,计算公式如下:

$$C_t^{TS,r} = (1 - \eta_s \Delta t) C_{t-1}^{TS,r} + (P_t^{TS,c} - P_t^{TS,f}) \Delta t \quad (25)$$

(4) CSP 电站发电出力的相关约束。

a. CSP 电站出力约束:

$$P_{Gmin} \leq P_{Gt} \leq P_{Gmax} \quad (26)$$

其中,  $P_{Gmax}$  和  $P_{Gmin}$  分别为 CSP 电站的最大和最小出力。

b. CSP 电站爬坡率约束:

$$-r_{dG} \leq P_{Gt} - P_{G(t-1)} \leq r_{uG} \quad (27)$$

其中,  $r_{uG}$ 、 $r_{dG}$  分别为 CSP 电站的最大向上、向下爬坡率。

(5) 网络约束。

以经济性最优为目标对各机组进行出力调度,兼顾网络约束,防止出现传输线路容量越限的问题。输电线路传输容量约束如下:

$$-P_{fl,max} \leq P_{l,t} \leq P_{zl,max} \quad (28)$$

其中,  $P_{zl,max}$ 、 $P_{fl,max}$  分别为传输线路  $l$  的最大正向、反向传输功率;  $P_{l,t}$  为输电线路  $l$  在时段  $t$  的传输功率。

$$P_{ij} = (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) G_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} B_{ij} \quad (29)$$

其中,  $P_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间传输线路的有功传输功率;  $G_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间传输线路的支路电导;  $B_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间传输线路的支路电纳;  $V_i$  为节点  $i$  的电压;  $V_j$  为节点  $j$  的电压;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间的电压相角差。

正常运行时的电力系统, 其节点电压在额定电压附近, 且支路两端相角差很小, 而对于超高压电力网而言, 线路电阻  $r_{ij}$  比电抗小得多。因此, 可做假设如下:  $V_i = V_j = 1$  p.u.,  $\sin \theta_{ij} = \theta_{ij}$ ,  $r_{ij} = 0$ 。则式 (29) 可以简化为:

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \quad (30)$$

其中,  $x_{ij}$  为支路电抗。

#### 4 模型求解

遗传算法具有简洁、适应性高且鲁棒性强的特点, 对于处理变量多、约束复杂的电力系统经济调度问题具有较强的适应性。在传统遗传算法的基础上加入精英保留策略, 可使父代种群中的最优个体直接保存到子代种群, 克服了传统算法存在局部最优、收敛速度慢等不足<sup>[20-21]</sup>, 有效提高了结果的可信性。因此, 含精英保留策略的标准遗传算法可用于解决本文含多变量及复杂约束的日前调度问题。

通过含精英保留策略的标准遗传算法对模型进行求解的主要过程如附录中图 A1 所示。

#### 5 算例分析

本文采用 IEEE 30 节点系统进行仿真分析, 利用含精英策略的标准遗传算法, 求解综合成本最小时 CSP 电站与火电机组的最优出力, 验证所提方法的可行性与有效性。

算例系统接线图如附录中图 A2 所示, CSP 电站并网节点为节点 16。系统中有 6 台火电机组, 具体数据见文献[22], 100 MW CSP 电站的具体参数如附录中表 A1 所示, 典型调度日 24 个时段的负荷预测值如图 1 所示。CSP 电站并网后的环境效益系数  $k_G = 230$  元/MW, 取  $r_{dk} = r_{uk}$ ,  $r_{dG} = r_{uG}$ 。

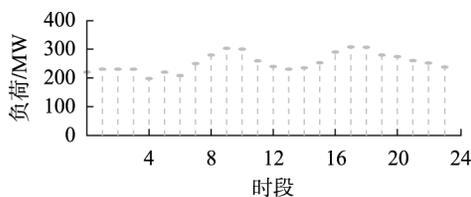


图 1 调度日系统的预测负荷

Fig.1 Predicting load of system in scheduling day

遗传算法中选取初始种群规模大小为 300, 最大迭代次数为 300。参加交叉运算的染色体个数占全体染色体总数的比例为 0.9, 发生变异的基因位数占全体染色体基因总位数的比例为 0.25。

为实现本文方法对全年各调度日有效性的快速检验, 首先选取一年中具有代表性的春分、夏至、秋分和冬至这 4 d 进行具体的经济调度分析, 其光照辐射强度如图 2 所示。

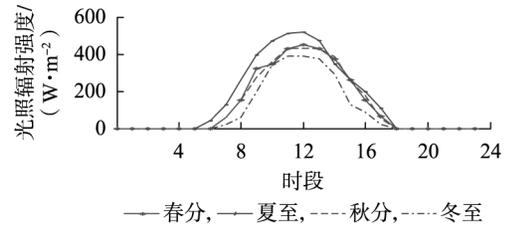


图 2 光照辐射强度

Fig.2 Light radiation intensity

根据算例数据, 在系统安全运行条件的约束下求解目标函数, 得到迭代 300 次后系统的综合成本收敛特性如图 3 所示。

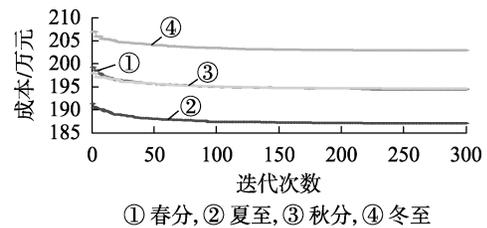


图 3 含储热 CSP 电站联网运行综合成本

Fig.3 Operating comprehensive cost of grid-connected CSP plant with thermal storage system

从图 3 可以看出, 这 4 d 的综合运行成本曲线均严格单调, 并且经过 300 次迭代后, 种群的重复率均达到了 90% 以上, 因此可认为达到了全局收敛的最优解<sup>[24]</sup>。冬至日的综合运行成本最高, 夏至日最低, 春分与秋分相差不大。并且, 从图中可见, 通过储热系统对 CSP 电站出力进行调节, 能够使系统的运行成本显著降低。

此时, CSP 电站最优发电出力调度曲线见图 4。

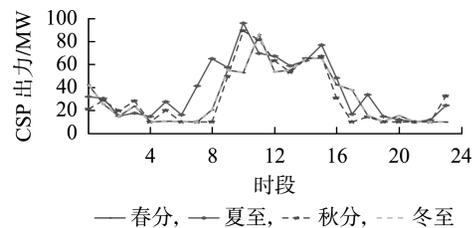


图 4 调度日含储热 CSP 电站最优出力调度曲线

Fig.4 Optimal output scheduling curve of CSP plant with thermal storage system in scheduling day

图 4 所示的 CSP 电站的出力即为成本最优时的调度值, 按此出力对 CSP 电站进行调度, 能够在保证电网安全性的基础上实现经济性最优的目标。对比图 4 所示的 CSP 电站出力与图 1 所示的电网负荷曲线可见, CSP 电站的最优经济调度在一定程度上追随负荷的变化, 充分展现了 CSP 电站储热系统带来的出力可调度性。

CSP 电站按最优出力调度时,各火电机组的出力调度曲线如图 5 所示。

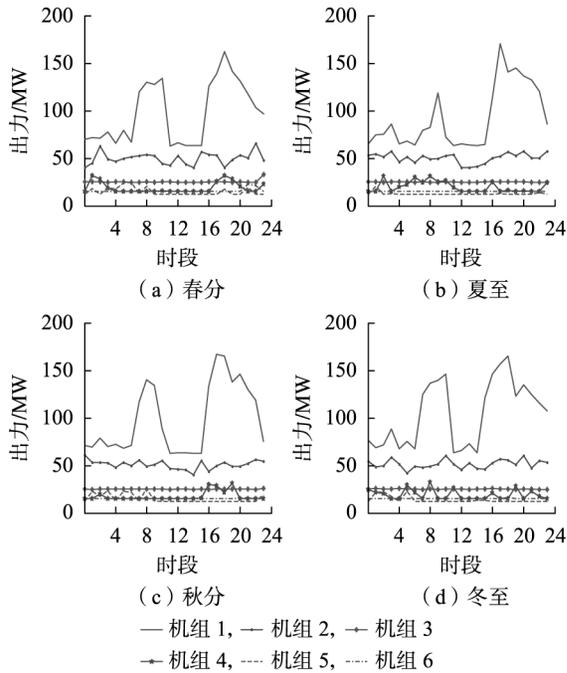


图 5 调度日各火电机组最优出力调度曲线  
Fig.5 Optimal output scheduling curve of thermal power units in scheduling day

由图 5 可以看出,煤耗成本较低的火电机组出力较大,煤耗成本较高的火电机组出力均维持在较低的出力水平。对比图 4 与图 5 可见,在 CSP 电站出力较大时,各火电机组的发电出力均维持在最小出力附近,减小了火电机组的发电量,进而降低了火电机组的燃料成本。

在此经济最优调度过程中,CSP 电站储热系统的储放热功率如图 6 所示。

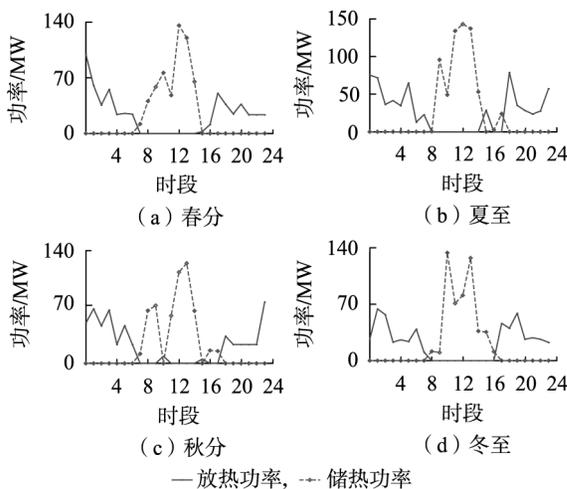


图 6 调度日储热系统储热、放热功率

Fig.6 Thermal storage power and exothermic power of thermal storage system in scheduling day

由图 6 可知,一个调度周期内储热量与放热量相同,即储热系统在调度周期内的始末值保持一致,

且储热与放热不在同一时段进行。储热系统在负荷低谷期储热,在负荷高峰期放热,达到转移 CSP 电站发电量的目的,从而实现 CSP 发电的出力调度。

为验证所得 CSP 电站出力调度的经济性,与 CSP 电站自然出力并网(即不对 CSP 电站出力进行调度)对比,同样基于含精英保留策略的标准遗传算法得到此时的最优综合成本,对比结果如表 1 所示。

表 1 不同并网方式成本对比

Table 1 Cost comparison of different ways of grid connection

CSP 电站 并网方式	最优综合成本/万元			
	春分	夏至	秋分	冬至
自然出力并网	199.41	194.39	199.63	205.76
最优调度并网	194.45	187.00	194.55	202.92

由表 1 中 4 个典型调度日的数据可见,采用最优调度值出力与不对 CSP 电站的出力进行调度相比,按经济最优调度时的综合成本显著降低。综合 4 d 的运行成本,按经济最优出力调度时的综合成本平均降低了 5.07 万元,节约了 2.53%。

在上述 4 个典型调度日分析的基础上,再以 1 a 为调度周期,对最优调度出力与自然出力并网时的经济性进行对比,结果如图 7 所示。

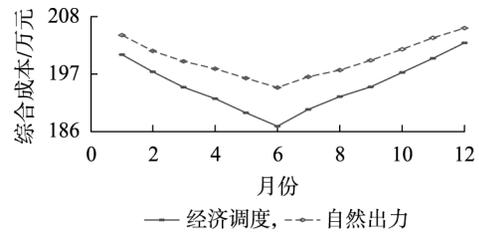


图 7 CSP 经济调度出力与自然出力经济性对比  
Fig.7 Economical comparison between economic dispatching and natural output of CSP

由图 7 可见,CSP 电站通过经济调度并网时经济效益明显,且综合运行成本变化趋势为由高到低再到高,通过与光照辐射强度对比可看出,CSP 电站的发电量越多,通过经济调度取得的经济性越明显。综合一年的运行成本,按经济最优出力调度与自然出力并网时相比,综合成本平均降低了 5 万元,节约了 2.5%。可见,通过合理地出力调度能有效降低系统运行成本,获得最佳的经济效益。

CSP 电站与火电机组的联合并网运行将是一种重要的发电形式,当火电机组与 CSP 电站按经济最优调度值并网运行时,能够充分发挥 CSP 电站的可调度性,有效降低综合运行成本。

## 6 结论

本文从成本最优的角度研究了 CSP 电站与火电机组的联合出力调度问题,建立了计及火电机组

发电成本、CSP 电站并网消纳的环境效益和运行维护成本、旋转备用成本的综合成本目标函数,确定了综合成本最优时的 CSP 电站与火电机组联合出力调度,并通过算例分析验证了该方法的有效性,得到以下的结论。

a. CSP 电站并网时会对电网功率平衡产生一定的影响,当大规模并网时,若不对其出力进行调度,将会对电网运行的安全性与经济性造成较大的影响。

b. CSP 电站具有较强的可调度性,合理利用此特性能有效提高 CSP 电站联网运行的经济效益。当 CSP 电站按经济最优出力调度并网消纳时,能有效降低系统综合运行成本。通过算例表明,综合 1 a 的运行成本,按经济最优出力调度与自然出力并网时相比,综合成本平均降低了 5 万元,节约了 2.5%。

本文所提调度方法充分利用了 CSP 电站的可调度性,为 CSP 电站的经济性并网运行提供了有力的参考方案。但本文研究中并未计及 CSP 电站与火电机组的初始投资、线路传输损耗等因素,在后期研究中将进一步完善模型,使建立的模型更加符合实际。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [ 1 ] International Energy Agency (IEA). Concentrating solar power technology roadmap [R/OL]. [2018-01-28]. [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf).
- [ 2 ] 杜尔顺,张宁,康重庆,等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5765-5775.  
DU Ershun,ZHANG Ning,KANG Chongqing,et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5765-5775.
- [ 3 ] 崔杨,张超,穆钢,等. 基于能耗费用评估的电网最优风电接纳功率分析[J]. 电网技术,2014,38(8):2174-2179.  
CUI Yang,ZHANG Chao,MU Gang,et al. Analysis on power grid's optimal accommodation of wind power based on energy cost assessment[J]. Power System Technology,2014,38(8):2174-2179.
- [ 4 ] 于娜,李铁松. 计及风电不确定性的虚拟电厂优化调度[J]. 东北电力大学学报,2017,37(5):14-18.  
YU Na,LI Tiesong. Optimal scheduling of virtual power plant considering wind power uncertainty[J]. Journal of Northeast Electric power University,2017,37(5):14-18.
- [ 5 ] 贾祺,严干贵,李泳霖,等. 新型多端输入光伏并网系统运行控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):43-48.  
JIA Qi,YAN Gangui,LI Yonglin,et al. Operation control strategy of novel multi-input grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):43-48.
- [ 6 ] LUO Q,ARIYUR K B,MATHUR A K. Control-oriented concentrated solar power plant model[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2016,24(2):623-635.
- [ 7 ] COCCO D,SERRA F. Performance comparison of two-tank direct and thermocline thermal energy storage systems for 1 MWe class concentrating solar power plants[J]. Energy,2015,81:526-536.
- [ 8 ] ABUTAYEH M,ALAZZAM A,KHASAWNEH B. Optimizing thermal energy storage operation[J]. Solar Energy,2015,120(678):318-329.
- [ 9 ] USAOLA J. Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets[J]. IET Renewable Power Generation,2012,6(1):59-66.
- [ 10 ] SIOSHANSI R,DENHOLM P. The value of concentrating solar power and thermal energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2010,1(3):173-183.
- [ 11 ] DESIDERI U,CAMPANA P E. Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant[J]. Applied Energy,2014,133(113):422-433.
- [ 12 ] BRAND B,STAMBOULI A B,ZEJLI D. The value of dispatchability of CSP plants in the electricity systems of Morocco and Algeria[J]. Energy Policy,2012,47(10):321-331.
- [ 13 ] MADAENI S H,SIOSHANSI R,DENHOLM P. Estimating the capacity value of concentrating solar power plants with thermal energy storage;a case study of the southwestern United States[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1205-1215.
- [ 14 ] XU T,ZHANG N. Coordinated operation of concentrated solar power and wind resources for the provision of energy and reserve services[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(2):1260-1271.
- [ 15 ] 陈润泽,孙宏斌,李正烁,等. 含储热光热电站的电网调度模型与并网效益分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):1-7.  
CHEN Runze,SUN Hongbin,LI Zhengshuo,et al. Analysis of grid dispatching model and grid-connected benefit of concentrating solar power plant with heat storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(19):1-7.
- [ 16 ] 徐二树,高维,徐蕙,等. 八达岭塔式太阳能热发电蒸汽蓄热器动态特性仿真[J]. 中国电机工程学报,2012,32(8):112-117,157.  
XU Ershu,GAO Wei,XU Hui,et al. Simulation of dynamic characteristics of steam accumulators in the Badaling solar power tower plant[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(8):112-117,157.
- [ 17 ] 晋宏杨,孙宏斌,郭庆来,等. 含大规模储热的光热电站-风电联合系统多日自调度方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):17-23.  
JIN Hongyang,SUN Hongbin,GUO Qinglai,et al. Multi-day self-scheduling method for combined system of CSP plants and wind power with large-scale thermal energy storage contained[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(11):17-23.
- [ 18 ] 郭志忠,叶瑞丽,刘瑞叶,等. 含抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):1-8.  
GUO Zhizhong,YE Ruili,LIU Ruiye,et al. Optimal scheduling strategy for renewable energy system with pumped storage station[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):1-8.
- [ 19 ] 胡浩,王英瑞,曾博,等. 基于 CVaR 理论的综合能源系统经济优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):209-219.  
HU Hao,WANG Yingrui,ZENG Bo,et al. CVaR-based economic optimal dispatch of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):209-219.
- [ 20 ] 颜伟,李翔,梁文举,等. 基于负荷分段技术的多目标月度发电计划及其遗传算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):47-52.  
YAN Wei,LI Xiang,LIANG Wenju,et al. Multi-objective monthly generation scheduling based on load partition technology and its genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):47-52.
- [ 21 ] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1994,5(1):96-101.

- [22] 杨天,王京波,宋少帅,等. 考虑风速相关性的电力系统动态经济调度[J]. 电工技术学报,2016,31(16):189-197.  
YANG Tian, WANG Jingbo, SONG Shaoshuai, et al. Dynamic economic dispatch of power system considering the correlation of the wind speed [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16):189-197.
- [23] DOMÍNGUEZ R, CONEJO A J, CARRIÓN M. Operation of a fully renewable electric energy system with CSP plants [J]. Applied Energy, 2014, 119(12):417-430.
- [24] 刘淳安. 动态多目标优化进化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011:25-32.

## 作者简介:



崔 杨

163.com)。

崔 杨(1980—),男,内蒙古包头人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析、新能源联网发电关键技术等(**E-mail**: cuiyang0432@163.com);

杨志文(1992—),男,山东滨州人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为光热发电并网运行控制(**E-mail**: yangzhiwen611@

## Day-ahead dispatch for output of combined CSP with thermal storage system and thermal power units based on minimized operation cost

CUI Yang<sup>1</sup>, YANG Zhiwen<sup>1</sup>, ZHONG Wuzhi<sup>2</sup>, ZHAO Yuting<sup>1</sup>, YE Xiaohui<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** CSP (Concentrating Solar Power) with thermal storage systems is advantageous in terms of effective controllability and dispatch ability. Optimal dispatching of CSP contributes to reduced operation cost of the power system. To minimize the operation cost, combined optimal dispatch of CSP with thermal storage system and thermal power units is proposed with the consideration of solar power conversion characteristics and operation constraints. This strategy considers the generation cost of thermal unit, the environmental benefits and the operation and maintenance costs added by the connection of CSP to the grid, system spinning reserve cost, and secure operation constraints, for which the optimal dispatch strategy of CSP with given thermal storage is obtained. The model is solved using genetic algorithm, and the effectiveness of the proposed method is verified by simulative results of IEEE 30-bus system.

**Key words:** minimized operation cost; thermal storage plant; concentrating solar power plant; thermal power unit; dispatch strategy

(上接第 70 页 continued from page 70)

- [21] JIN K M, THINH Q H, KIM E H. DVR control of DFIG for compensating fault ride-through based on stationary and synchronous reference frame [C] // 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC). Harbin, China: [s. n.], 2012: 3004-3009.



凌 禹

究方向为风力发电及其控制等(**E-mail**: pleasurely@126.com);

窦真兰(1980—),女,江苏泰州人,高级工程师,博士,主要研究方向为节能减排及新能源等(**E-mail**: zhenldou@126.com)。

## 作者简介:

凌 禹(1975—),男,山西阳高人,副教授,博士,主要研

## Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR

LING Yu<sup>1</sup>, DOU Zhenlan<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200434, China)

**Abstract:** Based on the characteristics that DVR (Dynamic Voltage Restorer) can restore voltage in a short time, the capability of DVR to assist DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind turbines for the improvement of asymmetrical voltage fault ride-through is investigated. For DFIG wind turbines, the topology and compensation strategy of DVR are selected. The DVR control method based on proportional-resonant controller is analyzed and a single-loop voltage feedback control strategy is proposed. The simulation experiments are performed with PSCAD/EMTDC. Results show that DFIG wind turbines can successfully ride through asymmetrical voltage faults under DVR protection and its improved transient behaviors.

**Key words:** Doubly-Fed Induction Generator (DFIG); fault ride-through; wind power generation; Dynamic Voltage Restorer (DVR); asymmetrical voltage fault

## 附录

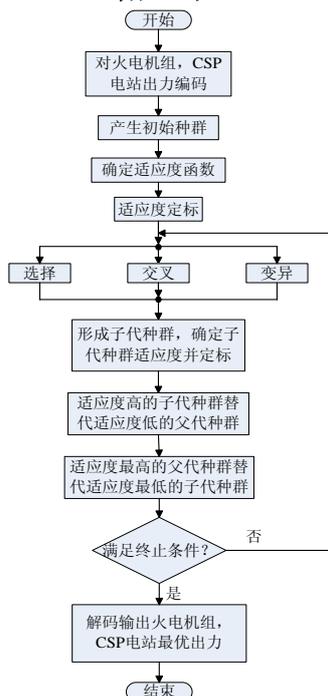


图 A1 含精英保留策略的标准遗传算法流程

Fig. A1 Flowchart of standard genetic algorithm flow with elite retention strategy

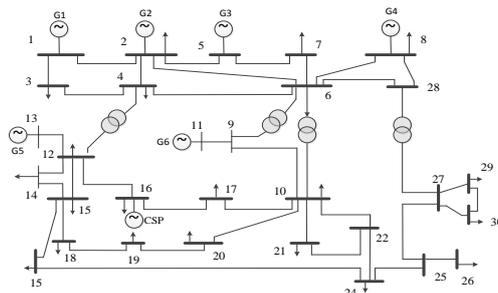


图 A2 IEEE30 节点接线图

Fig. A2 IEEE 30-bus wiring diagram

表 A 1 100MW CSP 电站参数

Table A1 Parameters of 100 MW CSP plant

参数	数值
CSP 电站额定输出功率 $P_G$ /MW	100
CSP 电站最小输出功率 $P_{Gmin}$ /MW	10
CSP 电站出力最大爬坡率 $r_{uG}$ /MW/h	40
储热系统的热耗散系数 $\eta_s$ /%	0.5
储热系统的充、放热损失率 $\eta_c$ 、 $\eta_t$ /%	3
CSP 电站热电转换效率 $\eta_d$ /%	45
CSP 电站光热转换效率 $\eta_l$ /%	51
CSP 电站的镜场面积 $S$ /hm <sup>2</sup>	100
集热装置供热发电成本系数 $k_s$ /元/MWh <sup>[23]</sup>	20
储热装置供热发电的成本系数 $k_{Ts}$ /元/MWh <sup>[23]</sup>	40
储热系统日最大储热容量 $C_{max}^{TS}$ /MWh	1000
储热系统储热容量初始值 $C_{10}^{TS}$ /MWh	400
储热系统储热下限 $C_{min}^{TS}$ /MWh	100