

水火电力系统短期节能发电优化调度的研究

周艺环¹ 刘正² 吴子豪¹

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100;
2. 陕西省电力公司, 西安 710048)

摘要 本文以提高水火电力系统联合运行的经济和环保效益为总目标, 从减少化石燃料的使用量和降低燃煤机组发电成本两方面考虑, 将含梯级水电站电力系统短期发电调度问题化为4个具有时序的优化子问题: 即梯级水电站发电量最大、水电耗水量最小、火力发电污染物排放最小以及火力发电总成本最小。以此建立的优化调度模型不仅可以确定火电的最佳出力和水电的最佳蓄放水策略, 还可描述水电和火电的互补作用, 充分体现节能和效益的理念。在模型求解上, 针对粒子群算法易陷入局部最优的缺点, 在标准粒子群优化算法中引入自适应惯性权重和最差粒子, 避免了算法的局部最优和过早收敛; 针对各目标量纲不同, 权重系数难以合理确定的多目标优化问题, 运用满意度函数和欧式距离函数对其进行归一化处理, 并采用改进粒子群算法对处理后的目标进行优化求解。算例仿真验证了所建模型的正确性及算法的有效性。

关键词: 节能降耗; 水火电优化调度; 改进粒子群算法; 多目标; 梯级水电站

Short-term Energy-saving Generation Optimization Scheduling of Hydro-thermal Power System

Zhou Yihuan¹ Liu Zheng² Wu Zihao¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710048;
2. State Grid Shaanxi Electric Power Corporation, Xi'an 710048)

Abstract This article aiming at improving the economy of hydrothermal combined power system operation and environmental benefits, we can solve the problems from the two aspects of reducing the use of fossil fuels and the cost of coal-fired generating units. We can convert the optimal scheduling of short-term study of water and thermal into a sequence of four optimization sub-problems: maximal cascaded energy output, the minimum of hydroelectric water consumption, the minimum of thermal power pollutant discharge and the minimum of thermal power cost. The optimization scheduling model can not only determine the optimal output of thermal power and the best water storage strategy of hydropower, but also describe the complementary roles of hydropower and thermal power, fully embodies the concept of energy conservation and efficiency. In the view of the shortcoming that particle swarm optimization (PSO) algorithm is easy to fall into local optimum, worst particle and adaptive inertia weight are introduced in the standard particle swarm optimization algorithm, avoiding the premature convergence and falling into local optimum. For the multi-objective optimization problem which each target are different dimension and weight coefficient is hard to reasonably determine, desirability function and Euclidean distance function are used to the normalize processing, and the improved particle swarm optimization algorithm is adopted to optimize target after processing. The examples simulation verify the correctness of the model and the effectiveness of the algorithm in this article.

Keywords: saving; optimizationscheduling of hydro-thermal; improved PSO algorithm; multi-objective; cascade hydropower stations

在水火电力系统优化调度模型的构建和优化方法的应用方面,国内外均取得了丰硕成果。文献[1-9]构建了水火电力系统的确定性模型,以系统负荷的一定百分比作为所选附加备用需求的参考值来应对由负荷波动引起的附加旋转备用容量,将优化调度问题转化为确定性的数学模型,不考虑水电厂来水量的随机性。文献[10]在市场环境下为了应对来水量的不确定性,采用隶属度函数使来水量模糊化,为了兼顾火力发电和水力发电两个方面,将水火电力系统中火电厂发电费用最小和水电厂用水量偏差最小同时作为优化目标,通过模糊优化方法来平衡,并使用原对偶内点法求解该多目标模糊优化问题,具有较好的收敛性能。文献[11-12]引入模糊理论建立多目标水火电优化调度的模糊模型,采用最大化满意度指标法将多目标转化为单目标优化,然后通过遗传算法求解此问题。文献[13-14]采用多目标差分进化算法求解多目标优化问题。

本文从电力系统负荷优化分配和水力资源的利用程度两个方面着手,综合考虑环境保护、节约能源以及水电厂的运行特点,研究如何在水火电系统短期发电调度计划中实现节能降耗,提高电力系统的发电效益以及环境效益。短期优化调度的核心内容是:在约束范围内,最大程度降低弃水量,从而确定出各水电厂的放水量和发电量,在提高水力资源的利用程度的同时,使得火电厂的运行成本尽可能地最小化,以实现水火电力系统在调度周期内经济效益最高、环境效益最大的目的^[16]。

1 水火电短期优化调度模型的建立

本文从水力资源利用合理化和提高环境保护效益的角度出发,综合考虑火电厂的煤耗特性、环境因素和弃水调峰的影响,以火电厂总发电成本费用、污染气体排放量及水电站发电量、耗水量为优化目标,建立考虑环保效益的水火电力系统的短期多目标优化调度数学模型,该优化模型不但能够确定火电厂的最佳出力,而且还能合理制定水电的最优蓄放水策略,以实现合理充分利用水力资源,降低火力发电运行成本,减少有害气体排放量,提高水火电力系统的经济环保效益为目标,在体现水电和火电之间互补作用的同时也能充分显现出节能降耗的理念。

1.1 目标函数

1) 火电机组发电总成本优化模型

不考虑火电机组的阀点效应,则

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} a_i + b_i \times P_{git} + c_i \times P_{git}^2 \quad (1)$$

若考虑阀点效应,则

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} a_i + b_i \times P_{git} + c_i \times P_{git}^2 + \\ |d_i \sin(e_i(P_{gi}^{\min} - P_{git}))| \quad (2)$$

式中, f_1 为火电机组调度周期内发电总成本, N_g 为火电机组的总个数, T 为调度周期, 在本文中取 $T=24\text{h}$, P_{git} 表示在 t 时刻火电机组 i 的出力。

2) 火电机组污染物排放量优化模型

综合节能减排和环境保护的要求,火力发电厂在发电过程中排放的有害气体(如 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等)应最大程度降到最低,基于环保宗旨,目标函数为

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} E_{git} \quad (3)$$

污染气体排放量用统一表达式表示:

$$E_{git} = \alpha_i + \beta_i P_{git} + \gamma_i P_{git}^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{git}) \quad (4)$$

式中, f_2 为调度周期内火电机组总污染物排放量, E_{git} 为时段 t 机组 i 的污染气体排放量; α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ξ_i 、 λ_i 为火电机组 i 的排放特征系数。

3) 在考虑到梯级水电站的水库来水时,应该积极充分地利用水电站的发电能力,最大程度的提高调度周期内梯级水电站的总发电量,水电站发电能力的预估模型可表示如下:

$$f_3 = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_h} 9.81 Q_{hit} H_{hi} \eta_{hi} T_{60} \quad (5)$$

式中, Q_{hit} 表示第 i 级水电站在 t 时段发电流量(m^3/s); η_{hi} 表示梯级水电站中第 i 级水电机组的综合发电效率; H_{hi} 表示第 i 级水电站在第 t 时段平均发电净头(m); T_{60} 表示调度的一个时段,为 1h 。

4) 水电站耗水量最小优化模型

在含梯级水电站电力系统短期优化调度研究中,必须考虑水力资源合理利用因素-水电站耗水量。可表示为

$$f_4 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_h} (Q_{hit} + S_{hit}) \quad (6)$$

1.2 约束条件

1) 电力系统约束条件

(1) 电力系统负荷平衡约束

若电网结构不予考虑,那么由电力生产和电能消耗的同时性可知,水火电力系统的总出力与系统负荷应该平衡,即

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{git} + \sum_{i=1}^{N_h} Q_{hit} = P_{Lt} \quad (7)$$

式中, P_{Lt} 为 t 时刻水火电力系统的总负荷 (MW)。

(2) 系统旋转备用容量约束

由于水电站运行方式灵活、负荷调节速度迅速,所以,在研究水火电力系统优化调度时,系统的旋转备应该由火电和水电共同承担,即

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{git}^{\max} + \sum_{i=1}^{N_h} P_{hit}^{\max} - P_{Lt} \geq 0 \quad (8)$$

式中, P_{git}^{\max} 、 P_{hit}^{\max} 分别为火电机组 i 、水电机组 i 在 t 时刻的最大出力 (MW)。

2) 火电机组约束条件

(1) 火电机组出力约束

$$P_{gi}^{\max} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\min} \quad (9)$$

式中, P_{gi}^{\max} 、 P_{gi}^{\min} 分别为火电机组 i 允许的最大及最小出力。

(2) 爬坡约束

火力发电机组的运行特点决定了在短时间内其功率无论是下降速度或上升速度,均有一定的额度,即存在所谓的爬坡速率限制:

$$D_{ri}T_{60} \leq P_{git} - P_{git-1} \leq U_{ri}T_{60} \quad (10)$$

式中, D_{ri} 、 U_{ri} 分别为火电机组 i 的上下爬坡率的极限值。

3) 水电机组约束条件

(1) 水电转换关系

水电机组的有功出力值与水库的发电引用流量以及水头等特性有关,如果计及水头变化,可以通过发电引用流量与库容的函数^[17]来表示输出功率值,表达式如下:

$$P_{hit} = d_{1i}V_{hit}^2 + d_{2i}Q_{hit}^2 + d_{3i}V_{hit}Q_{hit} + d_{4i}V_{hit} + d_{5i}Q_{hit} + d_{6i} \quad (11)$$

式中, V_{hit} 为 t 时段水库 i 的库容; d_{1i} 、 d_{2i} 、 d_{3i} 、 d_{4i} 、

d_{5i} 、 d_{6i} 为水电机组 i 的相关有功出力计算特性系数,在理论计算中,一般某一个水电站可以等效地用一台等值的水力发电机组来表示。

(2) 水电机组的出力约束

$$P_{hi}^{\min} \leq P_{hit} \leq P_{hi}^{\max} \quad (12)$$

式中, P_{hi}^{\min} 、 P_{hi}^{\max} 分别表示水电机组 i 在 t 时段的最小、最大技术出力。

(3) 水库的库容、发电流量限制

$$V_{hi}^{\min} \leq V_{hit} \leq V_{hi}^{\max} \quad (13)$$

$$V_{hi0} = V_{hi}^{\text{ini}}, V_{hit} = V_{hi}^{\text{end}} \quad (14)$$

$$Q_{hi}^{\min} \leq Q_{hit} \leq Q_{hi}^{\max} \quad (15)$$

式中, V_{hi}^{\min} 表示水库 i 的库容上限, V_{hi}^{\max} 表示水库 i 的库容的下限; V_{hi}^{ini} 表示水库 i 的初始库容, V_{hi}^{end} 表示水库 i 调度期末的库容; Q_{hi}^{\max} 表示水电站 i 的最大发电引用流量, Q_{hi}^{\min} 表示水电站 i 的最小发电引用流量。

(4) 水电站水头约束

$$H_{hi}^{\min} \leq H_{hit} \leq H_{hi}^{\max} \quad (16)$$

式中, H_{hi}^{\min} 表示水库 i 库容的最小工作水头; H_{hi}^{\max} 表示水库 i 库容的最大工作水头。

2 模型的求解

2.1 多目标优化问题

多目标优化是指在一个问题中,求解多个不相关联甚至互相矛盾的目标函数的适应值,从某一角度对该问题进行有条件优化。本文运用满意度函数和欧式距离函数对量纲不同的多目标进行归一化处理,避免人为因素影响,将多目标问题进行标量化处理,转化为单目标,然后选用合适的人工智能优化方法求解单目标优化问题。其具体的实施步骤如下。

步骤 1: 通过确定各目标的隶属度函数,从而将多目标优化问题转化为非线性单目标问题求解。极小化型和极大化型的隶属度函数如下^[15]:

$$\mu(f(x)) = \begin{cases} 1 & f(x) \leq f_{\min} \\ \frac{f_{\max} - f(x)}{f_{\max} - f_{\min}} & f_{\min} < f(x) < f_{\max} \\ 0 & f(x) \geq f_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu(l(x)) = \begin{cases} 1 & l(x) \geq l_{\max} \\ \frac{l_{\max} - l(x)}{l_{\max} - l_{\min}} & l_{\min} < l(x) < l_{\max} \\ 0 & l(x) \leq l_{\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $f(x)$ 为极小化型函数; $l(x)$ 为极大化型函数; f_{\max} 、 l_{\max} 表示目标函数的最大值; f_{\min} 、 l_{\min} 表示目标函数的最小值; $\mu(f(x))$ 、 $\mu(l(x))$ 为隶属度函数。

步骤 2: 构造欧氏距离目标函数, 针对每个目标函数均设置一个参考隶属度值 μ_{rm} , 以各目标函数的隶属度与参考隶属度之间距离的最小值作为优化准则, 从而获得模糊化处理数学模型:

$$\begin{aligned} \min d(x) &= \min \|\mu(F(x)) - \mu_{rm}\|_2 \\ &= \min \sqrt{\sum_{i=1}^F (\mu(F_i(x)) - \mu_{rm})^2} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, p 为目标函数个数; $d(x)$ 为构造的欧氏距离, μ_{rm} 为各目标满意度函数 $\mu(F_i(x))$ 的最优值, $\mu(F_i(x))$ 是在所有目标函数的约束下可以找到某个最优解 x 的函数, $\mu(F(x))$ 和 μ_{rm} 之间的距离越小, 表明越接近最优值。

步骤 3: 采用改进粒子群优化算法对处理后的目标进行优化求解。

2.2 改进粒子群算法

本文在总结现有研究成果的基础上, 主要从惯性权重、适应度值选取以及优化搜索机制等方面着手, 提出了一种粒子群算法混合改进策略。

1) 惯性权重

本文采用指数方式调整的惯性权重变化策略^[18], 即

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \exp \left[-b \times \left(\frac{k}{M} \right)^2 \right] \quad (20)$$

式中, w_{\max} 、 w_{\min} 、 b 为控制因子; k 为当前迭代次数, M 为总迭代次数。

2) 双适应度值的设计

对于含复杂约束的非线性优化问题求解的难点在于约束条件的处理方法在很大程度上会影响其解的可行性, 而双适应度方法则能够较好地对约束条件进行处理, 且不影响解的可行性。

其中目标适应度用下式表示:

$$F_{\text{obj}}(x_i) = f(x_i) \quad (21)$$

对于如式(19)的等式与不等式约束条件 $p > q$, 约束适应度可表示为式 (23):

$$\begin{cases} h_j(x_i) = 0 & j = 1, 2, \dots, q \\ g_j(x_i) \geq 0 & j = q+1, q+2, \dots, p \end{cases} \quad (22)$$

$$F_{cj}(x_i) = \begin{cases} |h_j(x_i)| & j = 1, 2, \dots, q \\ 0, g_j(x_i) \geq 0 & j = q+1, q+2, \dots, p \\ |g_j(x_i)| & g_j(x_i) < 0, j = q+1, q+2, \dots, p \end{cases} \quad (23)$$

则总的约束适应度为

$$F_c(x_i) = \sum_{j=1}^p F_{cj}(x_i) \quad (24)$$

(3) 最差粒子的引入

鸟群在寻食飞行过程中, 不仅会向其自身的最佳位置和粒子群中的最好位置聚集, 而且还会在搜寻食物过程中将没有食物的位置即最差位置记下, 防止在以后的搜寻过程中又一次飞往该位置, 也就是每个微粒均有远离其自身的最差位置和粒子群中最差粒子位置的趋势^[18]。

用 $P_{\text{worsti}} = (p_{\text{worsti1}}, p_{\text{worsti2}}, \dots, p_{\text{worstiD}})$ 表示每个微粒的最差位置, 用 $G_{\text{worsti}} = (g_{\text{worst1}}, g_{\text{worst2}}, \dots, g_{\text{worstD}})$ 表示粒子群中所有粒子的最差粒子位置, 那么粒子速度的迭代公式如下所示:

$$\begin{aligned} v_{id\text{best}}(k+1) &= wv_{id}(k) + c_1 r_1 (p_{\text{bestid}}(k) - x_{id}(k)) + \\ &\quad c_2 r_2 (g_{\text{bestd}}(k) - x_{id}(k)) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} v_{id\text{worst}}(k+1) &= wv_{id}(k) + c_1 r_1 (p_{\text{worstd}}(k) - x_{id}(k)) + \\ &\quad c_2 r_2 (g_{\text{worstd}}(k) - x_{id}(k)) \end{aligned} \quad (26)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + \xi v_{\text{bestid}}(k+1) + (1-\xi) v_{\text{worstd}}(k+1) \quad (27)$$

式中, k 表示迭代次数, $p_{\text{bestid}}(k)$ 表示粒子 i 在第 k 次迭代第 d 维的最好位置, $p_{\text{worstd}}(k)$ 表示粒子 i 在第 k 次迭代第 d 维的最差位置; $g_{\text{bestd}}(k)$ 表示目前为止种群中第 d 维的最好位置; $g_{\text{worstd}}(k)$ 表示目前为止种群中第 d 维的最差位置; $v_{id\text{best}}(k+1)$, $\xi \in (0,1)$ 表示经验学习因子; $v_{id\text{worst}}(k+1)$ 表示粒子向最好位置靠近的飞行速度, $v_{id\text{worst}}(k+1)$ 表示粒子远离最差位置的飞行速度。

3 实例仿真

3.1 原始数据及主要参数

本文的水火电力系统算例包括某电网直调的3座梯级水电站和一个火电厂，梯级水电站的主要参数见表1；火电厂的主要参数见表2。计算中，以一天24h为调度周期。混合改进粒子群算法的初始参数：种群数量 $N=100$ ， $c_1=c_2=0.2$ ， $w_{\max}=0.9$ ， $w_{\min}=0.4$ ， $b=3$ ，最大迭代次数 $M=1000$ ，以10次计算的平均值作为最终结果。

表1 梯级水电站主要参数

	最大库容/亿m ³	设计水头/m	正常蓄水位/m	调节能力	有无区间来水
A电站	247	122	2580	年调节	AB间 无区间来水 BC间 有区间来水
B电站	6.3	106	2005	日调节	
C电站	57	103	1724	不完全年调节	

表2 火电厂机组主要参数

火电机组编号 <i>i</i>	1	2	3
P_{gi}^{\min}/MW	20	40	50
P_{gi}^{\max}/MW	175	300	500
$U_{ti}/(\text{MW}/\text{h})$	120	120	110
$D_{ti}/(\text{MW}/\text{h})$	-120	-120	-110
$a_i/(\text{US\$}/\text{h})$	100	120	150
$b_i/(\text{US\$}/\text{MWh})$	2.45	2.32	2.10
$c_i/(\text{US\$}/(\text{MW})^2\text{h})$	0.0012	0.0010	0.0015
$d_i/(\text{US\$}/\text{h})$	160	180	200
$e_i/(1/\text{MW})$	0.038	0.037	0.035
$\alpha_i/(\text{lb}/\text{h})$	60	45	30
$\beta_i/(\text{lb}/\text{MWh})$	-1.355	-0.600	-0.555
$\gamma/(\text{lb}/(\text{MW})^2\text{h})$	0.0105	0.0080	0.0120
$\xi_i/(\text{lb}/\text{h})$	0.4968	0.4860	0.5035
$\lambda_i/(1/\text{MWh})$	0.01925	0.01694	0.01478

3.2 仿真结果分析

表3为水火电力系统短期节能调度优化前后日发电量计算结果和优化后日发电量计算结果。由此可以看出，优化后的梯级水电站发电量明显增加，而火电厂发电量则减少了，清洁能源水电优先调度应对波动负荷，提高了电力系统的经济环保效益。

优化前后梯级水电站耗水量见表4。结合图1、图2和表4，可以看出，优化后，A电站发电量有较大增加，加大了发电流量，一方面，降低了火电

出力，另一方面，B电站入库流量增大，水位提高，从而降低了发电耗水量。同时，由于A电站发电量的增加，C电站更多的承担了调节任务，从而发电量减少，也使得C电站蓄高水位，从而较大幅度的降低了C电站的耗水量，进而提高了整个梯级的水力资源的利用程度，同时，从表4可以看出优化后梯级水电站的弃水量减少了。

表3 短期调度优化前后日发电量对比

项目	A电站 发电量/ MW·h	B电站 发电量/ MW·h	C电站 发电量/ MW·h	水电 发电量/ MW·h	火电 发电量/ MW·h
优化前 发电量	11380.63	14620.38	12870.62	38871.63	14789.11
优化后 发电量	13724.80	16000.04	11660.22	41385.06	12254.96

1) 梯级水电站出力(MW)(如图1所示)

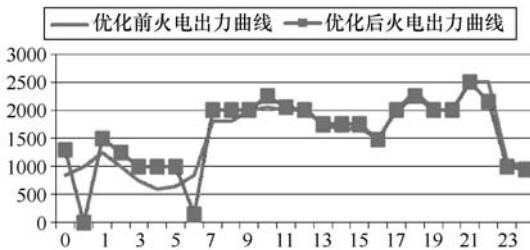


图1 梯级水电站短期调度优化前后出力对比

2) 火电出力(MW)(如图2所示)

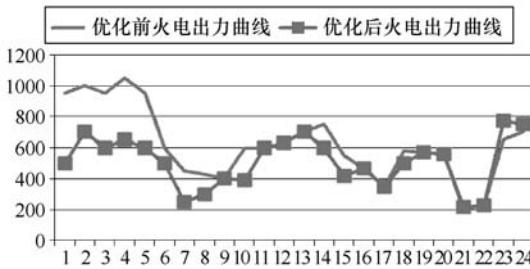


图2 火电厂短期调度优化前后出力对比

表4 短期优化前后梯级水电站耗水量对比

	弃水量/(10 ⁴ m ³)		发电量/MW·h		耗水量/(10 ⁴ m ³)	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
A电站	497.2	372.7	11380.63	13724.80	3292.4	3397.4
B电站	598.9	568.6	14620.38	16000.04	3708.2	3655.2
C电站	589.0	541.8	12870.62	11660.22	4428.6	4375.6
梯级	1601.1	1503.1	38871.63	41385.06	3834.4	3748.3

从表5可以看出，在梯级水电站参与调度优化后，火电出力减少，总的发电运行成本降低了

15.3%，污染气体排放量减少了33.9%，提高了整个电力系统的经济环保效益。

表5 短期优化前后火电出力、发电运行成本、污染物排放量对比

类型	火电出力/ MW	发电运行成本 / (US\$)	污染物排放量 / (lb)
优化前	14789.109	47443	46248
优化后	12254.94	40186	30581

从优化结果可以得出结论：含梯级电站的水火电力系统优化调度，能够合理优化负荷分配，充分利用水利资源，实现了多发水电，少发火电，节能降耗的目的，其优化结果较为理想。

4 结论

本文在综合考虑梯级水电站发电量最大，耗水量最小、火电出力最小、污染物排放量最小的基础之上，构建了水火电力系统多目标短期优化调度模型。多目标问题采用满意度函数和欧氏距离函数转化为单目标，再由改进的粒子群算法进行优化计算。最后实际算例的仿真结果显示。本文所构建的水火电力系统短期优化调度模型及所提算法能够有效提高系统的经济环保效益，且优化结果满足水火电调度时火电主要承担基荷以及水电负责调峰的基本原则。

参考文献

- [1] Bisanovic S, Hajro M, Dlakic M. Hydrothermal self-scheduling problem in a day-ahead electricity market[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(9): 1579-1596.
- [2] 邵宝珠, 王优胤, 宋丹. 电力期货在水火电资源优化配置中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 170-175.
- [3] 吴宏宇, 管晓宏, 翟桥柱, 等. 水火电联合短期调度的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 82-88.
- [4] Yu B H, Yuan X H, Wang J W. Short-term hydro-thermal scheduling using particle swarm optimization method[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 1902-1908.
- [5] 陈建建, 赵彩虹, 高星辰, 等. 配电网中分布式电源的优化配置研究[J]. 电气技术, 2016, 17(5): 36-40, 44.
- [6] 韩冬. 水火电短期优化调度模型和算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] 赵彪, 孙智华, 宗薇薇. 含风/火/水发电的电力系统中长期优化调度[J]. 电气技术, 2016, 17(9): 34-38.
- [8] 艾琳, 华栋. 基于模糊优化和内点法的水火电系统短期经济调度[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 46-50.
- [9] 张晓花, 朱昌平, 陈星莺, 等. 计及节能减排的梯级水火电优化调度研究[J]. 华东电力, 2012(7): 1104-1107.
- [10] 卢有麟, 周建中, 王永强, 等. 水火电力系统多目标环境经济调度模型及其求解算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 93-100.
- [11] 覃晖, 周建中. 基于多目标文化差分进化算法的水火电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 90-97.
- [12] 陈道君, 龚庆武, 张茂林, 等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 10-17.
- [13] 周德建, 杨莉, 郭义明, 等. 基于免疫算法的水火电联合调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012(22): 32-37.
- [14] 胡国强. 梯级水电站优化调度模型与算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [15] 吴杰康, 唐力. 含不确定性负荷的水火电力系统随机优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 36-43.

作者简介

周艺环（1984-），女，陕西西安人，硕士，高级工程师，主要研究方向为电力系统自动化。

故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42, 48.

- [13] 陈建建, 赵彩虹, 高星辰, 等. 配电网中分布式电源的优化配置研究[J]. 电气技术, 2016, 17(5): 36-40.

作者简介

刘彦超（1990-），男，硕士研究生，研究方向为分布式电源的接入与保护。