

[分布式光伏]

基于光伏发电及储能系统的配电网运行电压优化控制的研究

文 / 刘冰
中国冶金科工集团有限公司

分布式光伏发电系统接入配电网时会引起电压抬升，对电能质量造成负面影响。在分析分布式光伏发电系统、储能设备以及用电负荷的运行特性基础上，提出通过安装SVG装置和储能设备来平衡电压偏差的方案。对于多变量多目标寻优问题，引入改进的文化算法进行分析求解，得到最优容量组合，进而在某配电变压器台区进行实际应用。统计数据表明，经过优化后，各节点电压的稳定性得到较大幅度的提升，台区10个节点的电压偏差由原来的20%下降至8%以内，电能质量达标，优化方案切实有效。

分布式光伏发电系统利用太阳能发电，减少环境污染，实现清洁能源转换。但是，光伏系统接入电网会引起电压偏差异常，大容量光伏系统在全功率输出时，引发电压大幅抬升，严重影响电能质量。房宇娇等人综合考虑电网规划和储能设备运行，建立了多目标双层规划模型，协调清洁能源的消纳能力。Garmabdari R等人分析了储能设备对电网的调节作用，建立了分布式储能容量和功率优化模型，分析了电压波动的优化效果。尚龙龙等人从不同季节的角度，研究储能设备的动态规划方案，以储能设备的经济价值为目标函数，建立MISOCP模型规划储能容量。何森等人在考虑分布式能源和分布式储能设备的基础上，建立多目标的双层优化策略，运用加权法和 ϵ -约束法转换为单目标优化问题，但算法收敛速度慢。王丽娜等人结合层次分析法，借助粒子群算法进行多目标寻优，优化DES系统的最低损耗问题，但没有涉及电压优化。李玲玲等人提出利用改进的鲸鱼算法，通过差分进化提高全局的搜索能力，但是没有考

虑分布式能源的时间特性。

上述研究成果在含分布式能源和储能系统的数学模型中具有有效性，但在多目标优化方面的算法准确度不够，且在优化过程中存在稳定性不足的情况，需对其进行一定改进。此外，上述研究成果大多未考虑电网实际运行状态，对电压优化控制的策略相对单一，没有在实际的配电网系统中应用验证。本文将分布式光伏发电系统、储能系统和无功补偿装置（SVG）综合考虑，提出配电网运行电压的综合优化方案，在实际配电变压器台区进行验证，大幅改善了电能质量，且应用效果能够支撑本文所提方案的合理性。

DES 系统运行特性分析

分布式光伏能源供应充足，对环境友好，但输出的功率受到光照强度、光照角度、季节特性和天气条件等多因素影响，功率波动性较大。引入分布式储能设备可有效解决有源配电网（DG）的电压波

项目基金：中冶集团公司科技项目：高比例新能源供配电系统优化配置与协调控制关键问题研究（33070262）

动和功率波动问题。

1. 分布式光伏发电运行特性分析

分布式光伏发电系统的功率输出具有典型的时间特性，光伏发电系统的Beta功率输出概率密度函数为

$$f(q) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{p}{p_m} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{p_m - p}{p_m} \right)^{\beta-1} \quad (1)$$

$$p = q \sum A_i \eta_i \quad (2)$$

式中， Γ 为伽马函数； p 为当前时刻光伏系统的输出功率，W； p_m 为输出功率的峰值，W； α 、 β 为分布形状系数； q 为光强值； q_m 为光强峰值； A_i 为第 i 块光伏板的面积； η_i 为第 i 块光伏板的转换效率。

典型的分布式光伏发电系统的功率输出曲线如图1所示。

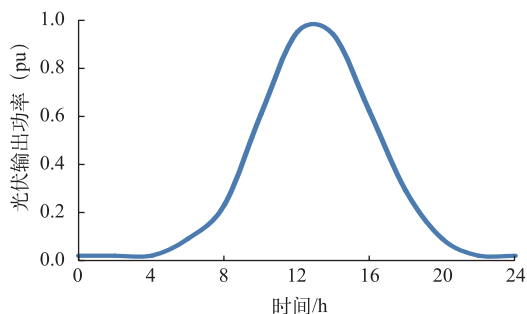


图1 光伏发电系统的功率输出曲线

2. 储能系统运行特性分析

在配电系统中，储能设备具有电源和负荷的双重属性，可以作为光伏发电系统和配电网之间的缓冲设备，配置有源电网的峰值特性。储能设备的电气原理如图2所示。

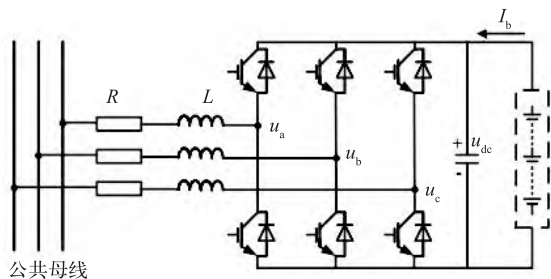


图2 储能设备的电气原理

储能设备由蓄电池、平波电容器和全控型绝缘栅双级晶体管(IGBT)组成，通过线路变压器和稳压装置等，与配电网的公共母线连接。

储能设备运行于放电模式时，系统容量为

$$E_{\text{des}}(t) = E_0(1 - \delta) - \frac{P_{\text{des}}(t)}{\eta} \Delta t \quad (3)$$

储能设备运行于充电模式时，系统容量为

$$E_{\text{des}}(t) = E_0(t-1)(1 - \delta) + P_{\text{des}}(t) \eta \Delta t \quad (4)$$

式中， E_0 为储能设备初始容量； δ 为自放电流率； P_{des} 为充放电功率； η 为充放电效率。

3. 用电负荷运行特性分析

用电负荷也具有典型的时间特性，随着时间不断变化，典型的用电负荷功率曲线如图3所示。

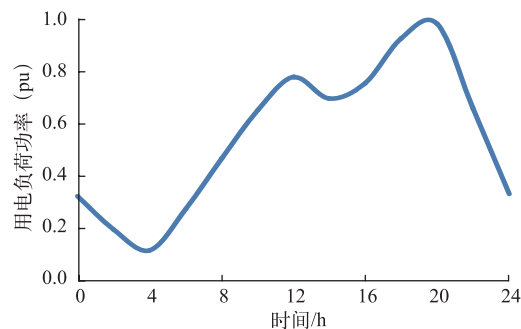


图3 用电负荷功率曲线

4. 光伏发电系统投入对配电网的影响

光伏发电系统投入配电网，用电负荷的有功需求减少，无功传输也减少，将导致系统电压大幅升高。特别是分布式光伏系统的数量达到一定规模后，会出现逆向潮流，功率因数无法控制，大大增加电网损耗。

结合运行特性分析，每天的14:00左右光伏发电系统达到输出功率峰值，而此时用电负荷恰好处于一个暂时性的需求低谷时期，供求不匹配。而当19:00左右用电负荷达到用电需求峰值时，光伏发电系统的输出功率仅为峰值的20%左右，不能满足本地用电设备需要。

为了实现用电负荷的功率匹配，通常引入储能设备。含分布式光伏发电系统和储能系统的有源配电网(DES)如图4所示。

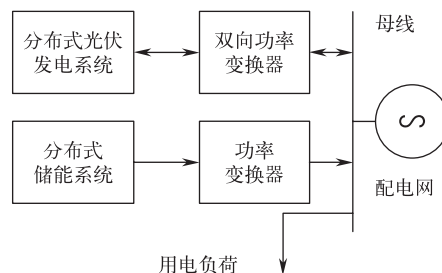


图4 有源配电网(DES)结构图

在光伏输出功率峰值期，储能设备储存部分容量，吸纳光伏系统发出的电能；在用电负荷高峰期，储能设备充当电源的角色，向外输送电能。与此同时，分布式储能也增加了配电网的复杂性。因此，分布式储能容量的配置关系能否发挥其积极的作用。

配电网运行电压优化

配电网运行电压的优化控制不仅要求电压稳定，还应减少网络损耗。

1. 优化方案

在实际的配电网中，某一辖区的节点数量通常较多，分布式光伏发电系统一般就近接入某个节点。为了优化运行电压，每个接入分布式光伏发电系统的节点，均接入储能系统，容量按照组合寻优策略计算。同时，辖区内的所有节点都接入SVG装置，通过SVG对电压偏差进行最终的治理，SVG容量同样按照组合寻优策略计算。

SVG通常由晶闸管电抗器TCR和三相电容器FC组成。TCR通过改变触发角大小，可实现无功功率的动态补偿，抑制电压波动，实现阻抗分相调整，平衡不对称负荷。FC通过三相调谐滤波器，可过滤3次~7次谐波，补偿功率因数，保持节点电压的稳定。

2. 优化策略

在追求电压偏差和网络损耗最低的情况下，对储能设备容量和SVG容量的组合优化，成为典型的非线性、多目标求解问题。配电网电压优化的目标函数为

$$f = \min \sum_{t=1}^T (\gamma_1 C^{v,t} + \gamma_2 C^{p,t}) \quad (5)$$

$$C^{v,t} = \sum (U_i^t - U_i^{\text{ref}})^2 \quad (6)$$

$$C^{p,t} = \sum \frac{(P_i^t)^2 + (Q_i^t)^2}{(U_i^t)^2} R_i \quad (7)$$

式中， γ_1 、 γ_2 为电压偏差和电网损耗的权重系数； $C^{v,t}$ 为电压偏差； $C^{p,t}$ 为电网损耗； U_i^t 为节点*i*在*t*时刻的电压值； U_i^{ref} 为节点电压标准值； P_i^t 为节点*i*在*t*时刻的有功功率； Q_i^t 为节点*i*在*t*时刻的无功功率； R_i 为节点*i*所在支路的电阻。

对运行电压优化控制的问题转化为求解目标函数的最小值问题。为求解多目标的多变量问题，引

入基于惩罚机制的改进文化算法ICA，可解决变量数目繁多的寻优问题。IGA算法可以模拟种群传承机制，实现基于规则制度的筛选最优个体，对于表现较差的个体给予惩罚或者淘汰，加快迭代速度。

IGA算法由种群空间和信仰空间构成双层进化机制，种群空间从微观的角度模拟种群传承，信仰空间从宏观角度模拟文化传递。信仰空间与种群空间互相独立，各自进化；但是进化过程互相影响，信仰空间对种群空间的进化具有指导作用。IGA算法结构如图5所示。

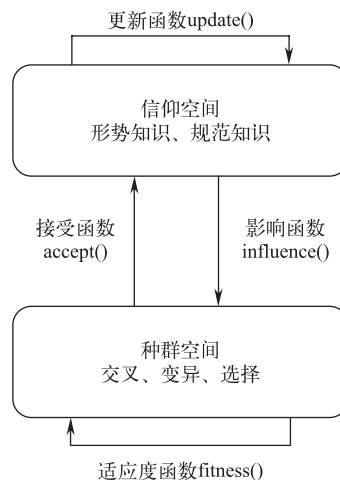


图5 IGA算法结构

3. 优化算法详细设计

(1) 适应度函数

通常，适应度函数用于评价种群空间的个体对于解决目标问题的优劣，适应度越大，表示该个体的性能越优。因此，以目标函数式(5)的倒数作为适应度函数，并确定两个目标的权重分别为0.6、0.4。

(2) 交叉操作

交叉操作采用两点交叉算法，设定交叉概率为0.91。满足交叉条件时，随机选取两个交叉点，交换交叉点之间的编码。

(3) 变异操作

变异操作是产生新个体的有效方法，算法设置变异概率为0.25。满足变异条件时，系统随机产生2个变异点，将变异点之间的浮点数编码逆向转换，成为一个新个体。

(4) 选择操作

选择操作可以将群体中适应度高的个体保留下来，进而进行下一代的遗传。对于适应度值较低的

个体，能够被选中的概率相对较小。

利用轮盘赌算法，设置选择概率为0.82。个体被选中的概率与自身适应度值相关。

(5) 形势知识

形势知识储存若干优秀个体的信息，按照各自的适应度进行排列，指导种群空间的进化趋势，形势知识表示为

$$S = \{s_1^t, s_2^t, \dots, s_m^t\} \quad (8)$$

式中， s_i^t 为第 t 代的第 i 个优秀个体； m 为形势知识规模。

信仰空间的更新由update()函数实现，形势知识按以下规则更新

$$s^{t+1} = \begin{cases} s_{\text{best}}^t & f(s_{\text{best}}^t) > f(s^t) \\ s^t & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中， s^t 为当前的优秀个体； s_{best}^t 为第 t 代的优秀个体； $f(s_{\text{best}}^t)$ 为第 t 代优秀个体的适应度； $f(s^t)$ 为当前优秀个体的适应度。

(6) 规范知识

规范知识可记录每个优秀个体的约束条件，表示为个体的取值范围信息

$$N = \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n\} \quad (10)$$

式中， z_j 为形势知识中的个体，由取值范围的上限组成。

规范知识按以下规则更新

$$l_i^{t+1} = \begin{cases} z_{j,i} & z_{j,i} \leq l_i^t \text{ or } f(z_j) > L_i^t \\ l_i^t & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

$$L_i^{t+1} = \begin{cases} f(z_j) & z_{j,i} \leq l_i^t \text{ or } f(z_j) > L_i^t \\ L_i^t & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

$$u_i^{t+1} = \begin{cases} z_{k,i} & z_{k,i} \geq u_i^t \text{ or } f(z_k) > U_i^t \\ u_i^t & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

$$U_i^{t+1} = \begin{cases} f(z_k) & z_{k,i} \geq u_i^t \text{ or } f(z_k) > U_i^t \\ U_i^t & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

式中， l_i^{t+1} 为第 $t+1$ 代个体的下限； L_i^{t+1} 为第 $t+1$ 代个体下限的适应度； l_i^t 为第 t 代变量的下限； L_i^t 为第 t 代变量下限的适应度； u_i^{t+1} 为第 $t+1$ 代变量的上限； U_i^{t+1} 为第 $t+1$ 代变量上限的适应度； u_i^t 为第 t 代变量 z_j 的上限； U_i^t 为 z_j 上限的适应度； $f(z_j)$ ， $f(z_k)$ 为 z_j 和 z_k 的适应度。

(7) 接受函数

接受函数引入惩罚控制策略，在进化前期，较

多个体进入知识空间。进化后期，种群中个体文化程度都提高到相当水平，可减少接受规模，对于适应度值较低的个体给予淘汰，避免知识空间重复操作。设定预选择接受的优秀个体数目为 m ，计算 m 个个体中每两个之间的欧氏距离，然后进行惩罚操作。当欧式距离小于惩罚水平时，淘汰这类个体，在保证保留了优秀个体优势的同时，防止其无限增长而占满种群空间，使问题收敛于局部最优。

动态接受函数的表达式为

$$m = \begin{cases} P\beta - P\beta(1/C_f) & \sum \|z_i - z_j\| < L \\ P\beta + 2 & \sum \|z_i - z_j\| \geq L \end{cases} \quad (15)$$

式中， m 为信仰空间接受优秀个体的数目； $1/C_f$ 为拥挤因子； L 为欧氏距离阈值，设定取值为0.37。

(8) 影响函数

影响函数通过形势知识调整种群的进化方向。

影响函数为

$$z_{j,d}^{t+1} = \begin{cases} z_{j,d}^t + |s(I_i) R_a(0,1)| & z_{j,d}^t \leq s_i^t \\ z_{j,d}^t - |s(I_i) R_a(0,1)| & z_{j,d}^t > s_i^t \end{cases} \quad (16)$$

式中， $s(I_i)$ 为个体取值范围的长度； $R_a(0,1)$ 为随机数，取值0~1； s_i^t 为形势知识中的变量。

算例分析

1. 算例情况

南方地区某县供电局的配电网分布式光伏系统布置较为分散，而且由于配电网的建设时期较早，变电站台区多为分相运行，出现了分布式光伏系统接入时电能质量超标问题。该地区某10 kW/0.4 kW变压器台区的低压侧结构如图6所示。其中节点1为变压器低压侧第一个节点，其余为分支线联络点，节点4、6、7、10接入分布式光伏发电系统。

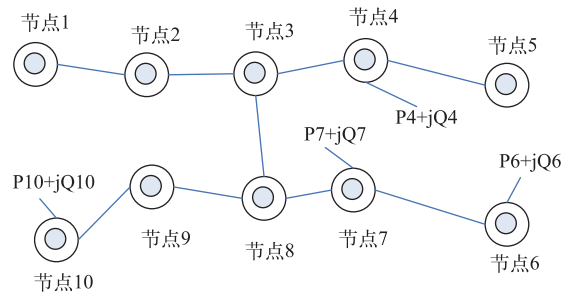


图6 变压器台区低压侧结构

分析该供电局提供的数据，得到用电负荷情况见表1。

表1 负荷分布情况

节点序号	负荷峰值/ kW	峰值出现时 刻	负荷谷值/ kW	谷值出现 时刻
节点1	288.5	19:23	97.6	3:07
节点2	173.6	19:24	43.2	3:06
节点3	125.4	19:25	39.5	2:47
节点4	124.6	19:21	37.1	2:55
节点5	91.3	19:28	21.9	3:03
节点6	131.4	19:18	33.6	2:49
节点7	189.4	19:19	51.2	2:51
节点8	271.1	19:21	85.3	3:01
节点9	142.1	19:22	56.2	3:12
节点10	182.5	19:21	45.6	3:11

分布式光伏发电系统的功率输出情况见表2。

表2 分布式光伏发电系统的功率输出情况

节点序号	功率峰值/kW	峰值出现时刻
节点4	151.2	14:23
节点6	143.1	14:23
节点7	123.5	14:23
节点10	141.6	14:23

由表1、表2数据可知，用电负荷的峰值与分布式光伏发电系统输出功率峰值的时间段明显不一致，而且分布式光伏发电系统的接入节点均未安装储能设备，使得系统电压波动异常，电能质量超差。

光伏发电系统接入电网，分析用电负荷高峰时、低谷时的电压运行数据，得电压偏差见表3。

表3 光伏发电系统接入时电压偏差

节点 序号	峰值电压/V	电压偏差 (%)	谷值电压/V	电压偏差 (%)
节点1	487.1	21.78	387.1	-3.22
节点2	479.8	19.95	389.3	-2.68
节点3	481.5	20.38	385.8	-3.55
节点4	487.2	21.80	390.6	-2.35
节点5	480.4	20.10	389.2	-2.70
节点6	479.7	19.93	392.6	-1.85
节点7	491.2	22.80	389.3	-2.68
节点8	487.5	21.88	385.7	-3.58
节点9	479.3	19.83	387.2	-3.20
节点10	486.6	21.65	391.4	-2.15

由表3可知，分布式光伏发电系统接入后，节点电压大幅抬升，峰值电压时的电压偏差严重超标（规范允许值为 $\pm 10\%$ ），必须进行治理。

2. 算例分析

(1) 编码设计

在分布式光伏发电系统的接入点安装储能设备，在所有节点安装SVG装置。为此，将4个节点处的储能设备的容量和10个SVG容量作为编码序列，依次排列，形成一个种群个体。

(2) 算法优化

通过MATLAB分析软件，运行ICA算法，进行100次迭代计算，得到适应度曲线如图7所示。

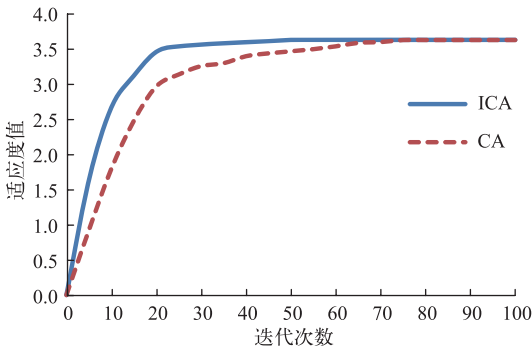


图7 适应度曲线

将最优解集合解析后得到参数见表4。

表4 最优解集合经解析后的参数

节点 序号	SVG容量/ Mvar	SVG容量序列/ Mvar	储能设备 容量/ (MW·h)	储能设备 容量序列/ (MW·h)
节点1	9.4	10	-	-
节点2	11.4	12	-	-
节点3	11.7	12	-	-
节点4	28.2	30	1.7	2.0
节点5	22.8	25	-	-
节点6	27.6	30	1.5	2.0
节点7	37.9	40	1.1	1.5
节点8	31.5	35	-	-
节点9	20.4	20	-	-
节点10	22.9	25	1.4	1.5

3. 电压优化效果分析

按照表4的SVG容量序列和储能设备容量序列，安装SVG装置和储能设备。投入运行后，节点1、节点4和节点7的运行电压分别如图8~图10所示。

由图8~图10可以看出，对系统安装SVG装置和储能设备后，各节点电压的稳定性得到较大幅度的提升。

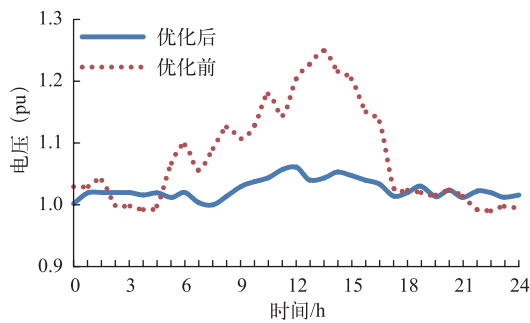


图8 节点1运行电压曲线

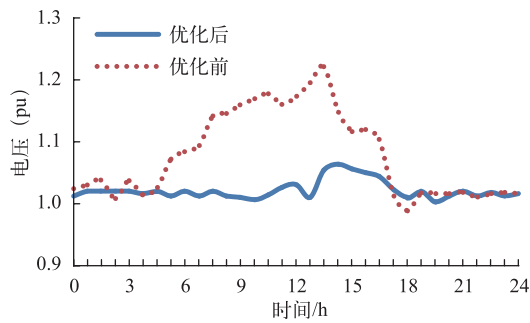


图9 节点4运行电压曲线

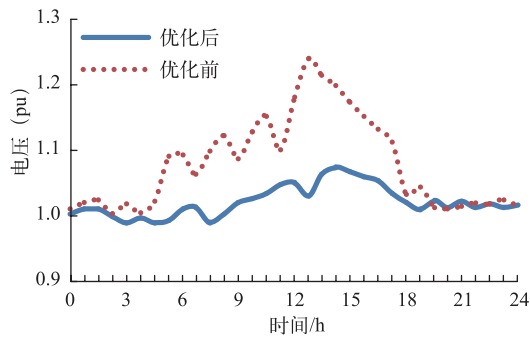


图10 节点7运行电压曲线

根据供电局提供的运行数据,统计节点1~10在24 h以内的最大电压偏差数据,见表5。

表5 电压偏差统计数据 (%)		
节点序号	优化前电压偏差	优化后电压偏差
节点1	21.78	6.15
节点2	19.95	5.72
节点3	20.38	5.49
节点4	21.80	5.93
节点5	20.10	4.48
节点6	19.93	6.24
节点7	22.80	6.21
节点8	21.88	7.71
节点9	19.83	5.34
节点10	21.65%	5.47%

由表5可知,SVG装置和储能设备投入运行后,配电网的电压偏差得到有效控制,电压偏差均小于10%,符合电能质量规范要求,验证了优化运行方案的有效性。

结束语

分布式光伏发电系统的输出功率和用电负荷的需求功率具有典型的时间特性,但二者的峰值和低谷期并不匹配。供求不匹配,容易引起电能质量超标。在分析分布式光伏发电系统、储能设备以及用电负荷运行特性的基础上,提出通过增设SVG装置和储能设备来优化运行电压的方案。所有节点都接入SVG装置,光伏发电系统节点接入储能系统。SVG和储能设备的容量组合是一个多变量多目标寻优问题。为此引入改进的文化算法进行分析求解,得到最优容量组合,进而在某配电变压器台区进行实际应用。统计数据表明,经过优化后,各节点电压的稳定性得到大幅提升,台区10个节点的电压偏差由原来的20%下降至8%以内,符合电能质量规范要求,保证了电能质量处于达标状态,验证了本文提出的优化方案的有效性。EA

(收稿日期: 2023-06-12)

参考文献

[1] 史可鉴,李胜川,朱义东,等.考虑电压稳定性与分布式电源接入的低压配电网无功优化研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2022,36(2): 80-85.

[2] 杨亘焯,孙荣富,丁然,等.计及光伏多状态调节能力的配电网多时间尺度电压优化[J].中国电力,2022,55(03): 105-114.

[3] 房宇娇,李树静,李宏仲,等.考虑广义储能的配电网双层规划研究[J].可再生能源,2020,48(17): 84-92.

[4] 何森.含可再生能源配电网中分布式储能多目标优化配置与运行研究[D].华南理工大学,2020.

[5] 王丽娜.基于改进粒子群算法的储能系统优化配置研究[D].中国矿业大学,2021.