

基于双向长短时记忆网络的并网 微电网能量供需平衡优化

王学兵^{1†}, 张国生¹, 宋宸¹, 张红权², 张雪成³

(1. 国网新疆电力有限公司 吐鲁番供电公司, 新疆 吐鲁番 838000; 2. 国网吐鲁番供电公司经济技术研究所, 新疆 吐鲁番 838000; 3. 天津市普迅电力信息技术有限公司, 天津 300000)

摘要:为保证并网微电网的稳定运行,针对微电网负荷波动较大,稳定性较差的问题,提出基于双向长短时记忆网络的并网微电网能量供需平衡优化方法。该方法通过双向长短时记忆网络划分并网微电网中的负荷类别,并引入注意力机制优化分类结果,获取并网微电网中的可控负荷结果;结合该结果和储能系统的能量损失情况、风光综合功率波动水平,构建目标函数并确定约束条件,采用改进帝国竞争算法求解目标函数,获取保证获取全局负荷调度最佳结果,实现并网微电网能量供需平衡优化。测试结果显示:该方法能够有效调度并网微电网中负荷,调整并网微电网供需侧有功和无功功率的结果,使其在 ± 0.50 kvar 内范围波动,优化后满足微电网中的而负荷需求;保证微电网的稳定运行。

关键词:双向长短时;记忆网络;并网微电网;能量供需;平衡优化;可控负荷

中图分类号: TM73

文献标识码: A

Optimization of Energy Supply and Demand Balance in Grid-connected Microgrid Based on Bidirectional Short and Long Time Memory Network

WANG Xuebing^{1†}, ZHANG Guosheng¹, SONG Chen¹, ZHANG Hongquan², ZHANG Xuecheng³

(1. Turpan Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Turpan, Xinjiang 838000, China;
2. Economic and Technological Research Institute of State Grid Turpan Power Supply Company,
Turpan, Xinjiang 838000, China;
3. Tianjin Richsoft Electric Power Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: In order to ensure the stable operation of the grid connected microgrid, aiming at the problems of large load fluctuation and poor stability of the microgrid, an optimization method of energy supply and demand balance of the grid connected microgrid based on bidirectional long-term and short-term memory network is proposed. This method divides the load categories in the grid connected microgrid through the bidirectional long-term and short-term memory network, and introduces the attention mechanism to optimize the classification results, so as to obtain the controllable load results in the grid connected microgrid. Combining this result with the energy loss of the energy storage system and the fluctuation level of the integrated wind and solar power, the objective function is constructed and the constraint conditions are determined. The improved Empire competition algorithm is used to solve the objective function to obtain the best result of the global load scheduling, so as to realize the optimization of the energy supply and demand balance of the grid connected microgrid. The test results show that this method can effectively dispatch the load in the grid connected microgrid, adjust the results of active and reactive power on the supply and demand side of the grid connected microgrid, make it fluctuate within the range of ± 0.50 kvar, and meet the load demand in the microgrid after optimization, ensure the stable operation of microgrid.

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 吐鲁番市港城物流园区源网荷储一体化研究项目(3022024-FW02)

作者简介: 王学兵(1970—),男,江苏淮安人,本科,中级工程师,研究方向: 结合项目源网荷储一体化。

† 通信联系人, E-mail: tujiang65397@163.com

Key words: bidirectional long and short hours; memory network; grid-connected microgrid; energy supply and demand; balance optimization; controllable load

微电网具有较好的灵活性、高效性,其可实现大量分布式电源并网,保证负荷多种能源形式的可靠供应,以此提升供电的可靠性、多样性^[1]。由于可再生能源具有显著不确定性,会导致并网微电网内发生能量供需不平衡,该现象会导致微电网内的负荷发生显著变化,影响其正常运行^[2];同时会引发电压和频率的越限,影响配电网的稳定性。因此,并网微电网在运行时,在保证其可靠供电的基础上,还需保证电网负荷的高性能。在并网微电网中接入的分布式储能单元数量较多时^[3],需保证网络中荷电状态平衡,如果其一旦发生失衡现象,会影响分布式储能单元的服役时间。因此,如何保证并网微电网能量供需平衡^[4],成为并网微电网运行管理的核心问题。

为实现并网微电网能量供需平衡,赵凤展等^[5]提出一种基于变分模态分解(variational modal decomposition, VMD)和模型预测控制(model predictive control, MPC)相结合的、多时间尺度滚动优化兼具反馈矫正的微电网优化调控模型,在调度过程中考虑不同类型储能和可控微电源在不同时间尺度上的运行特性,设计了 1 h 和 15 min 相结合的调度控制策略。黎海涛等^[6]提出基于改进竞争深度 Q 网络算法的相关能量管理方法,采用多参数动作探索机制和优化设计的神经网络结构,对分布式可再生能源的功率输出、能源交易市场的电价和电力负荷的状态等环境信息进行学习,运用学习到的策略进行微电网能量管理与优化。但是上述方法无法实现负荷类别的分类,对于负荷的调度。

双向长短时记忆网络(bi-directional long short-term memory, BLSTM)是以长短期记忆网络为基础,引入前、后两个相互交叉迭代训练过程,以此可显著提升网络的训练性能。因此,本文提出基于双向长短时记忆网络的并网微电网能量供需平衡优化方法,该方法采用优化的 BLSTM 预测并网微电网中的负荷情况,依据负荷预测结果实现并网微电网能量供需平衡优化。

1 并网微电网能量供需平衡优化

1.1 并网微电网负荷预测

1.1.1 基于 BLSTM 网络的并网微电网负荷预测
并网微电网能量供需平衡优化,就是通过最佳

的调度方案对微电网中的负荷实行调度,由于并网微电网接入大量可再生能源后,会发生显著的不确定性,引起微电网内负荷的显著波动,导致网络内的能量供需发生失衡。在微电网能量调度过程中影响因素较多^[7],并且存在可控负荷和不可控负荷,因此,在进行并网微电网能量供需平衡优化前,需准确掌握并网微电网中的负荷情况。本文则采用基于优化的 BLSTM 模型,对并网微电网中的负荷实行分类,获取其中的可控负荷,对该负荷实行最佳调度后,实现并网微电网能量供需平衡优化。

优化的 BLSTM 模型是以 BLSTM 网络的前、后向学习为基础,将获取的并网微电网运行数据输入后,通过前者的学习方式,实现该数据在顺序时间过程中存在关联性学习;结合未来数据^[8],采用后者的学习方式实现反馈之间的关联性;在此基础上,向 BLSTM 网络中引入注意力机制,提升网络对海量信息的处理和记忆能力,优化网络的训练效果,保证更佳的负荷分类结果。

在 BLSTM 模型中,引入前、后两个相互交叉迭代训练过程后,可使网络中增加前、后两个时间序列相反的隐含层,同时将两个隐含层与同一个输出层相连接,则前、后两个方向的隐含层计算公式为:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (1)$$

$$h'_t = o_t \cdot \tanh(f_{t+1} \cdot C_t + i_{t+1} \cdot \tilde{C}_{t+1}) \quad (2)$$

式中: f_t 表示遗忘门; C_{t-1} 表示输出门; i_t 表示经过作用函数计算后得出的信息; $\tilde{C}_t$ 表示更新后的信息; o_t 表示 t 时刻的输出结果。

BLSTM 网路能够对未来负荷信息进行同时学习,因此,该方法可完成可控和不可控两种负荷的分类^[9],以网络中的节点 B 为例,网络的输入向量 T_{B1} 和 T_{B2} 的计算公式为:

$$T_{B1} = \begin{cases} P_{Bh} \\ P_{Bw} \\ P_{Bd} \\ P_{Bt} \end{cases}, T_{B2} = \begin{cases} P_A \\ P_B \\ P_C \\ P_D \end{cases} \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 分别表示微电网中的节点,四者的有功负荷分别为 P_A 、 P_B 、 P_C 、 P_D 表示; P_{Bh} 、 P_{Bw} 、 P_{Bd} 、 P_{Bt} 均表示有功负荷分量,依次分别对应负荷节点受到经济发展影响情况下、受天气环境因素影响情况下、受工作日节假日影响情

况下、其他因素影响情况下。

1.1.2 并网微电网负荷分类优化

将注意力机制引入 BLSTM 網路中,计算 o_t 的注意力权值 w_t ,同时采用加权方式对 o_t 的特征进行处理,获取加权后的 o_t 结果,用 $\hat{o}_t$ 表示,并替换 o_t ,作为 BLSTM 網路的输入。该实现过程的计算公式为:

$$e_t = \text{Attend}(x_t, s_{t-1}, w_{t-1}) \quad (4)$$

$$w_{ij} = \frac{\exp(e_{ij})}{\sum_{j=1}^n \exp(e_{ij})} \quad (5)$$

$$\hat{o}_{ij} = w_{ij} o_{ij} \quad (6)$$

式中: e_t 表示注意力得分,其计算网络用 $\text{Attend}(\cdot)$ 表示;在 $t-1$ 时刻下,负荷的分类结果和注意力权值分别用 s_{t-1} 和 w_{t-1} 表示; j 表示初始迭代变量。基于此可知, e_t 是由 o_t 、 s_{t-1} 和 w_{t-1} 共同决定。

本文依据并网微电网的历史和过去两种数据,对并网微电网的负荷实行分类,结合输入数据的特征,引入注意力机制,提升网络对各个时刻输入数据特征的关注程度,提升网络对海量信息的处理和记忆能力^[10],整个分类步骤如下所述:

步骤 1:采用优化的 BLSTM 模型对并网微电网在当前时刻下,所有的源数据特征和负荷之间的关联程度。

步骤 2:通过激活函数 Softmax 函数,对关联程度的计算结果实行转换,形成概率表达形式。

步骤 3:将获取的概率结果与源数据特征的隐含表达结果相乘,采用乘积结果描述该特征对并网微电网中负荷分类贡献结果。

步骤 4:累加全部的贡献结果,采用该结果表示下一个负荷分类值的输入,完成下一时刻负荷的分类。依据该方式,进行循环计算,完成所有数据的处理^[11],实现全部时刻的负荷分类,输出分类结果,获取并网微电网中的可控负荷。

1.2 并网微电网能量供需平衡优化实现

1.2.1 并网微电网能量供需平衡优化目标函数

由于并网微电网是由光伏、风机以及储能系统和负荷等组成,因此,本文在对其实行能量供需平衡优化时,需对可控负荷实行能量调度。在调度过程中^[12],需结合储能系统的能量损失情况、风光综合功率波动水平和可控负荷情况,构建目标函数,以此获取最优结果,三者的目标函数分别用 f_1 、 f_2 、 f_3 表示,计算公式分别为:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \left[P_b(t) \frac{1-\eta_b}{\eta_b} \Delta t + P_d(t)(1-\eta_d) \Delta t \right] + \sum_{t=1}^T \left[P_c(t) \frac{1-\eta_c}{\eta_c} \Delta t + P_s(t)(1-\eta_s) \Delta t \right] \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{1}{\sum_{t=1}^T P_{DG}(t)} \sum_{t=1}^T P_{DG}(t) - P_{DG}(t-1) \quad (8)$$

$$\begin{cases} P(t) = P_v(t) + P_w(t) \\ P_{DG}(t) = P(t) + P_h(t) + P_g(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$f_3 = \max \left[\sum_{k=1}^n \text{opt}(x_k) \right] + \xi \quad (10)$$

式中:并网微电网日数据的采样点数量用 T 表示;在 t 时刻,蓄电池存在两种运行状态,分别为充电和放电,其功率分别用 $P_b(t)$ 和 $P_d(t)$ 均表示; $P_c(t)$ 和 $P_s(t)$ 表示功率,前者充电状态下,后者为放电状态下,均属于超级电容;蓄电池和超级电容在充电和放电两种情况下的效率分别用 η_b 和 η_d 、 η_c 和 η_s 表示;风光能源综合功率用 $P_{DG}(t)$ 表示; $P(t)$ 表示整体功率能量; $P_v(t)$ 、 $P_w(t)$ 、 $P_h(t)$ 、 $P_g(t)$ 均表示在 t 时刻下的功率,依次分别对应光伏、风电、蓄电池、超级电容; k 表示并网微电网的运行阶段; $\text{opt}(\cdot)$ 表示微电网在不同的运行阶段中,能量最优调度结果; ξ 表示误差调节系数。

约束条件:

确定目标函数之后,结合 2.1 小节对并网微电网负荷的分类结果,确定约束条件,其主要包含微电网中机组出力、功率守恒、蓄电池荷电量、能量备用率以及功率平衡几个方面的约束,各约束条件公式如下所述:

$$P_w(\min) \leq P_w \leq P_w(\max) \quad (11)$$

$$P_v(\min) \leq P_v \leq P_v(\max) \quad (12)$$

$$P_{h-\min}(\min) \leq P_h \leq P_{h-\min} \quad (13)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (14)$$

$$P_l(\min) \leq P_l \leq P_l(\max) \quad (15)$$

$$P_{gi}(\min) \leq P_{gi} \leq P_{gi}(\max) \quad (16)$$

$$P_w + P_v + P_h + P_l + P_{gi} - P_{load} \geq 20\% \quad (17)$$

$$P - \max(P_w + P_p + P_e + P_d + P_{gi}) > P_{load} \quad (18)$$

$$P_t^{\min} = P_t^{LD} + P_t^{\text{loss}} + P_t^{M, \text{int } er} \quad (19)$$

$$Q_t^{\min} = Q_t^{\text{svc}} + Q_t^{LD} + Q_t^{M, \text{int } er} \quad (20)$$

式中: P_l 、 P_{gi} 、 P_{load} 均表示有功功率,依次分别对应柴油发电机、微电网向大电网受电、负载所需;

max 和 min 表示最大值和最小值; soc 表示荷电状态;在 t 时段,负荷消耗和网损的功率分别用 P_t^{LD} 和 P_t^{loss} 表示,在该时段下,大电网以及微电网提供或者消耗的无功功率分别用 Q_t^{min} 、 $Q_t^{M,inter}$ 表示; Q_t^{svc} 表示全部无功功率,对应无功补偿器。

1.2.2 能量供需优化目标函数求解

完成并网微电网能量供需优化目标函数后,为获取最优的能量负荷调度结果,实现并网微电网能量供需平衡优化^[13],本文采用群体反向学习机制改进的帝国竞争算法对其实行求解,以此提升算法种群设备的合理性^[14],优化殖民地变革过程,保证获取全局负荷调度最佳结果,避免发生局部最优。改进后算法的求解步骤如下所述:

步骤 1:对国家种群实行初始化处理,并完成模型基础参数、最大迭代次数、收敛精度 δ 的设定。

步骤 2:对国家种群实行更新,其通过群体反向机制完成, C_n 如果表示国家,其变量用 $x_{n,i}$ 表示,该变量的取值范围为 $[a_i, b_i]$, C_n 的反向粒子则用 C'_n 表示,其变量用 $x'_{n,i}$ 表示,计算公式为:

$$x'_{n,i} = a_i + b_i - x_{n,i} \tag{21}$$

求解全部正向和反向两种粒子的国家势力,并对计算结果实行降序排列,获取前 D 个结果对应的国家,并将其作为新的寻优种群。

步骤 3:对各个帝国和殖民地的位置实行更新;并且,采用决策变量对获取的寻优种群的纳什均衡。

步骤 4:求解各个国家的势力结果,依据求解结果获取其中的部分国家,将其作为帝国;以此为核心,采用划分的方式对其他国家实行处理,使其归于帝国,形成殖民地。

步骤 5:引入殖民地变革率 γ ,保证各个殖民地在一维上,能够随机变化位置的概率。

步骤 6:需对帝国的势力范围实行重新分配出力,其通过殖民地竞争大方式完成;达到当前最大迭代次数时,输出最优帝国结果,将其定义为并网微电网可控负荷的最佳调度结果,即获取能量供需平衡优化解^[15];如果不满足当前最大迭代次数,则依据公式(22)进行判定:

$$\begin{aligned} &f_{up}(V^{(k)}, u_e^{(k)}, u_h^{(k)}, u_t^{(k)}) - \\ &f_{up}(V^{(k+1)}, u_e^{(k+1)}, u_h^{(k+1)}, u_t^{(k+1)}) \leq \delta \end{aligned} \tag{22}$$

式中: k 表示迭代次数; $(V^{(k)}, u_e^{(k)}, u_h^{(k)}, u_t^{(k)})$ 和 $(V^{(k+1)}, u_e^{(k+1)}, u_h^{(k+1)}, u_t^{(k+1)})$ 均表示一个可行决策变量 V^* 的一个广义纳什均衡解,前者对应当前第 k 次迭代,后者对应第 $k+1$ 次迭代。

如果满足公式(22),则输出最优结果,反之则

回转步骤 3,重新进行迭代,直到满足收敛条件。

2 测试分析

为验证本文方法的应用效果,将本文方法用于某并网微电网中,其结构如图 1 所示;结构中的可控微电源有功输出以及爬坡功率参数详情如表 1 所示。

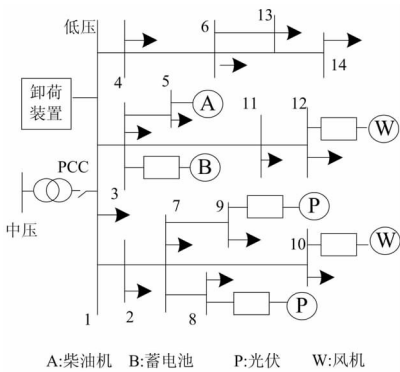


图 1 并网微电网结构

表 1 有功输出以及爬坡功率参数详情

参数名称		蓄电池	燃气轮机	柴油机
输出功率/kW	上限	75	130	100
	下限	10	20	15
爬坡率 kW/h ⁻¹	上限	450	350	320
	下限	450	350	320

在应用本文方法进行测试前,对该并网微电网的最大充放电功率、每日充放电量、系统装机容量、负荷时间序列数据等进行归一化处理,为组态均衡指标,确定发展性,设定指标的状态向量值 $\mathbf{X} = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$,根据状态变权向量设定指标对应的组态 $S(x) = S1(x), S2(x), \dots, Sm(x)$,设指标的常权向量为 $\omega = (\omega1, \omega2, \dots, \omega m)$,对项目相对重要目标的决策常权进行归一化计算,引入第 p 个分解系数 q_p^{n+i} ,归一化公式为:

$$Xnom = Hqp^{2,i} \frac{X - Xmin}{Xmax - Xmin} \tag{23}$$

由公式(7)可以看出,上述数据具有能量纲量, $Xnom \in [0, 1]$ 。引入熵值 H ,表示信号能量状态的稳定性,

不断调整层和层之间的权值矩阵,直至输出向量的预测值和实际值误差达到最小。

为衡量本文方法的应用效果,获取本文方法应用前、后,微电网内各个可控微电源的日出力情况,

由于篇幅有限,结果仅随机呈现燃气轮机的测试结果,如图 2 所示。

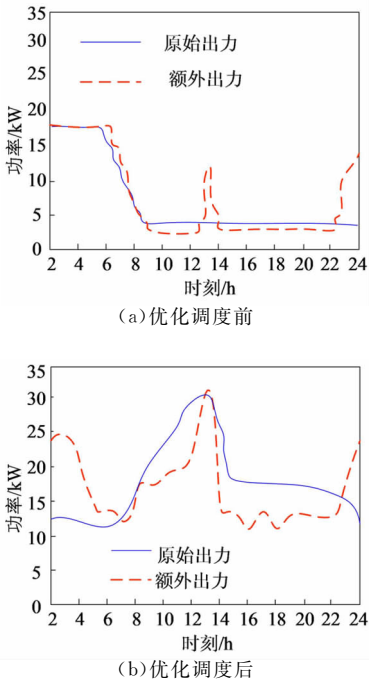


图 2 可控微电源出力测试结果

依据图 2 测试结果可知:采用本文方法进行负荷最优调度后,当微电网在运行过程中,发生能量缺额后,功率低于 10 kW 后,燃气轮机可在保证自身约束情况下实现额外出力,以此完成缺额部分的弥补;使功率达到 10 kW 以上,因此,本文方法具有良好的应用效果,能够对并网微电网中的负荷实行调度,以此实现微电网能量供需平衡。

为进一步衡量本文方法的应用效果,在负荷发生变化的情况下,微电网供需侧有功和功率的变化结果,如图 3 和图 4 所示。

依据图 3 和图 4 测试结果可知:在并网微电网运行的前 1s,微电网中负荷发生变化的情况下,微电网供需侧有功和无功两种功率发生显著的波动变化;采用本文方法对并网微电网中的可控负荷实行调度后,能够有效调整并网微电网供需侧有功和无功功率的结果,使其处于平稳状态下,在 0 kvar 上下波动,最大波动范围为 ± 0.50 kvar,以此实现微电网能量供需平衡优化。

为验证本文方法的应用性,获取并网微电网在典型日运行时间内的需求负荷结果,并将该结果与通过本文实行微电网能量供需平衡优化后的结果实行对比,以此衡量本文方法的应用性,结果如图 5 所示。

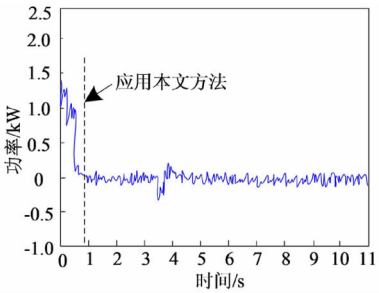


图 3 微电网供需侧的有功功率测试结果

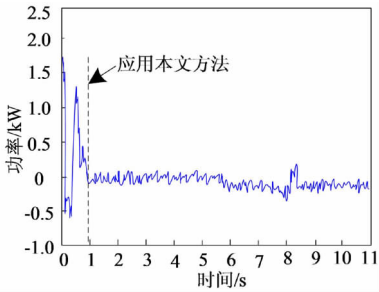


图 4 微电网供需侧的无功功率测试结果

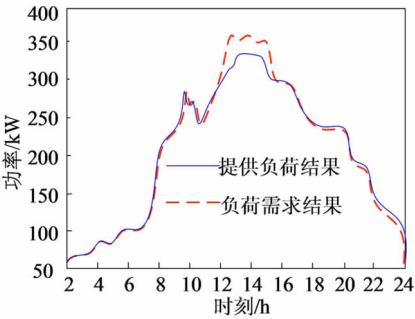


图 5 负荷需求和平衡优化后的负荷提供结果

依据图 5 测试结果可知:采用本文方法对并网微电网能量供需实行平衡优化后,微电网提供的负荷结果与微电网的负荷需求结果之间差异较小,其中在 12:00~16:00 时间段内,两者的差异相对较为明显,约为 20 kW 左右,该差异在微电网整体运行中影响较小,满足公式(17)的约束条件,是由于本文方法在进行并网微电网能量供需平衡优化时,可靠预测网络中的负荷类别获取可控负荷,并对可控负荷实行优化调度。因此,可保证良好的供需平衡优化效果,满足微电网中的负荷需求。

为更直观体现本文方法的应用效果,获取本文方法应用后,微电网在正常和故障两种工况下,电压和频率结果(两者的上限分别为 220 V 和 50 Hz),如表 2 所示。

表 2 整体发电量和总负荷量测试结果

时刻/h	正常工况		故障工况	
	电压/A	频率/Hz	电压/A	频率/Hz
3	220	50	218	49.92
6	219	49.98	220	49.9
9	218	49.96	218	50
12	220	50	218	49.96
15	219	50	220	49.65
18	220	49.98	219	49.64
21	220	49.92	219	50
24	218	50	218	49.92

依据表 2 测试结果可知:在不同的运行工况下,本文方法均可依据微电网中的负荷情况以及各个可控微电源的出力情况,进行微电网中的负荷调度,调整可控微电源的功率结果,可有效避免微电网中发生电压和频率越限问题,保证微电网的稳定运行。

为进一步确认本文方法的有效性,测试本文改进的帝国竞争算法的迭代收敛性,结果如图 6 所示。

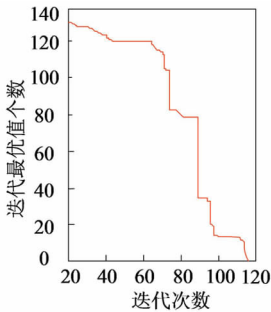


图 6 改进帝国竞争算法的迭代收敛性

由图 6 可知,本文改进的帝国竞争算法具有较好的收敛性,在迭代次数达到 113 时得到最优结果。本文方法能够基于 BLSTM 网络测并网微电网负荷预,且结合储能系统的能量损失情况、风光综合功率波动水平和可控负荷情况构建目标函数,最终通过改进的帝国竞争算法得到最优解,为并网微电网的稳定运行提供保障。

3 结 论

为保证并网微电网的运行稳定性,需使微电网内能量供需处于平衡、且负荷处于正常工作状态,因此,需对微电网内的负荷实行最优调度,实现并网微电网能量供需平衡优化。本文提出基于双向

长短时记忆网络的并网微电网能量供需平衡优化方法,并对该方法的应用情况展开相关测试。结果显示:本文所提方法具有良好的应用效果,实现微电网中缺额功率的弥补,有效调整并网微电网供需侧有功和无功功率的结果;最大程度满足微电网内的负荷需求,保证并网微电网的稳定运行。

参考文献

[1] 吴青峰,孙孝峰,才玮琪,等.考虑 SOC 平衡的并网微电网能量供需平衡方案[J].太阳能学报,2020,41(11):17-25.

[2] 曹金声,曾君,刘俊峰,等.考虑极限场景的并网型微电网分布鲁棒优化方法[J].电力系统自动化,2022,46(7):50-59.

[3] 叶雁型,刘洋,陈贤邦.考虑源荷双侧不确定的孤岛型微网能量管理优化模型[J].水电能源科学,2020,38(1):191-195.

[4] 齐四清,任春雷,张悦,等.基于双向长短时记忆网络的配电网关键线路单调性规律提取[J].电子器件,2021,44(6):1436-1442.

[5] 赵凤展,张启承,张宇,等.基于 VMD-MPC 法的并网型微电网多时间尺度能量协调优化调度[J].农业工程学报,2021,37(7):190-198.

[6] 黎海涛,申保晨,杨艳红,等.基于改进竞争深度 Q 网络算法的微电网能量管理与优化策略[J].电力系统自动化,2022,46(7):42-49.

[7] 郭玲娟,魏斌,韩清涛,等.基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J].高电压技术,2020,46(2):527-537.

[8] 齐四清,任春雷,张悦,等.基于双向长短时记忆网络的配电网关键线路单调性规律提取[J].电子器件,2021,44(6):1436-1442.

[9] 李华,于潇.基于 DDPG 的光储微电网系统能量决策优化[J].可再生能源,2021,39(5):687-693.

[10] 张弘,杨继斌,张继业,等.基于多种群萤火虫算法的车载燃料电池直流微电网能量管理优化[J].中国电机工程学报,2021,41(3):833-846.

[11] 何力,吕红芳,李俊甫,等.基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法(SA_AFSA)的微电网能量优化调度研究[J].太阳能学报,2020,41(9):36-43.

[12] 陈卫东,吴宁,黄彦璐,等.基于深度学习的微电网优化调度辅助决策方法[J].南方电网技术,2022,16(1):117-126.

[13] 林凌霄,廖碧英,管霖.基于风光资源特性的独立微电网电源优化配置方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(7):103-115.

[14] 王晓毅,唐忠.考虑供需自平衡和独立运行能力的并网型微电网容量优化配置[J].太阳能学报,2021,42(5):74-82.

[15] 张文霞,李彦哲,孙煌见,等.含恒功率负荷的直流微电网系统稳定性研究[J].计算机仿真,2020,37(3):83-88.