DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0062-06

含电动汽车充电及可再生能源发电的配电网协同运行优化模型

赵 宇[1]，李文博[2]，郝 俊[2]
（1.长春汽车职业技术大学 质量控制处，吉林 长春 130013；
2.长春汽车职业技术大学 汽车工程学院，吉林 长春 130013）

摘 要：随着配电网中可再生能源（renewable energy resources，RES）、电动汽车（electric vehicle，EV）充电的渗透率越来越高，RES出力的波动性和不确定性、EV的无序充电给电网正常运行带来了较大影响。提出一种与RES分布式发电（distributed generation，DG）相协调的EV协同运行优化模型。该模型整合了EV、多类别DG运行约束和系统运行目标，以确保系统可靠运行，并缓解RES产能不足/过剩。首先，采用基于自回归移动平均（auto-regression moving average，ARMA）时间序列模型的RES功率及EV充电功率预测方法，生成场景样本。接着，提出基于多类别DG运行框架的EV充/放电策略，并对电网运行的潜在影响因素进行评估。随后提出电容器选址定容方法以减少这种影响，这些方法的综合集成促进了EV与DG协调运行。该模型在134节点配电网进行了模型仿真，并采用可变权重及异步学习因子的改进粒子群（improved particle swarm optimization，IPSO）算法进行求解，算例结果验证了模型效果。

关键词：可再生能源；电动汽车；分布式发电；协同运行；自回归移动平均；选址定容
中图分类号：TP18；TM732 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-7241（2025）08-0062-06

Optimization Model for Coordinated Operation of Distribution Networks Connected to Electric Vehicles and Renewable Energy Resources Generation

ZHAO Yu[1], LI Wenbo[2], HAO Jun[2]
(1. Quality Control Department, Changchun Technical University of Automobile, Changchun 130013, China;
2. Automobile Engineering Department, Changchun Technical University of Automobile, Changchun 130013, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of renewable energy resources (RES) and electric vehicles (EV) in distribution networks, the volatility and uncertainty of RES output and the disorderly charging of EVs have a significant impact on the operation of power grids. In the paper, an optimization model of EV operation coordinated with RES distributed generation (DG) is proposed. The model integrates EV, multi category DG operational constraints, and system operational objectives to ensure the reliable operation of the system and alleviate the insufficient/excess RES production capacity. Firstly, a method for predicting RES power and EV charging power based on auto-regression moving average (ARMA) time series model is adopted to generate scenario samples. Then, an EV charging/discharging optimization method based on a multi-class DG operation framework is proposed, and potential factors of the grid operation are evaluated. A method for capacitor's site selection and capacity determination is proposed to reduce this impact. The comprehensive integration of these methods promotes the coordinated operation of EV and DG. The model is simulated on a 134-bus distribution network. The improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm with variable weights and asynchronous learning factors is used to solve the problem. The results of the numerical example verify its optimization effect.

Keywords: renewable energy resources; electric vehicles; distributed generation; coordinated operation; auto-regression moving average; site selection and capacity determination

0 引言

为了实现双碳目标及建立新型电力系统，RES发电在电力系统中扮演着重要的角色。然而，间歇性RES出力的不确定性，给电力系统安全运行带来了极大的挑战[1-3]。另外，EV近几年的迅速普及，使出行变得更加环保，但其无序充放电也给电网带来了一定冲击，容易导致配电系统电压偏差、过电压和网损增加[4-5]。EV和DG之间需要进行协调，以确保配电系统安全可靠运行[6-7]。

EV充电和RES发电的最优协调运行以减轻其对配电系统的不利影响已经得到了广泛研究。文献[8]基于态势感知技术，提出配电网内无功补偿设备与EV充电站联合参与的电压调整策略，通过构建二级调压模式确保配电网的电压稳定，但未考虑新能源发电及其不确定性

*基金项目：2022年教育部高等学校科学研究发展中心专项课题（ZJXF2022227）
收稿日期：2024-04-29

的影响。文献[9]提出了一种最优控制策略,以响应光伏功率波动,动态调整充/放电速率,可以缓解光伏发电过多导致的过电压和反向功率流,但考虑的DG类型较为单一。文献[10]在风电威布尔随机描述及EV分层调度策略的基础上,构建了含风电及EV的电力系统多目标动态环境运行调度模型,但算法时间复杂度较高,难以克服其搜索区域与速度上的缺陷。当前已有研究从市场角度对EV和RES的协调运行进行了讨论[11-12]。文献[13]利用合作型协同进化遗传算法求解纳什均衡,为典型电力市场交易场景的多方交易策略模型建立提供基础,但市场参与者之间存在利益冲突,需要考虑交易公平性问题。文献[14]提出了一种考虑"共享储能-需求侧资源"联合跟踪RES发电曲线的市场化消纳模式,增强了用户利用自身需求侧资源和共享式储能设备提高RES消纳的能力,但清洁能源固有的间歇性和波动性问题未能很好地解决。

在上述研究背景下,本文考虑RES不确定性和EV无序充放电,整合EV、多类别DG运行约束和系统运行目标,将其纳入EV和RES协同运行模型,并结合电容器选址定容优化,提出了一个含EV及DG的配电网协同运行优化框架,保证配电系统在可接受的电压约束和系统网损范围内实现最优运行,提升RES消纳水平。

1 含EV及RES发电的配电网协同运行优化模型

为应对RES出力的波动性和不确定性、EV的无序充电给电网带来的负面影响,采用基于ARMA时间序列模型的RES功率出力及EV驾驶模式预测方法,实现系统参数样本的生成。考虑各DG电源的出力分布和负荷调度,以及与主网之间的电力交互,在保证电网平稳、可靠运行的基础及EV需求的前提下,将运维成本和用户成本在最低限度。

1.1 ARMA时间序列模型

ARMA模型在获得原始时间序列时,首先对其平稳性进行检验。其次检验原始时间序列是否纯随机性,即序列是否存在显著相关性。最后根据符合标准的时间序列建立ARMA模型,利用样本自相关系数图和偏自相关系数图的性质确定模型的阶数(p,q),选择适当的ARMA模型拟合预测值序列。模型包括自回归过程AR模型和移动平均过程MA模型两部分。

AR模型的预测原理是用现时扰动和有限项过去的观测值来预测现时值。p阶自回归模型表达式如下:

$$Y_{\mathrm{par}}=\theta_1 Y_{t-1}+\theta_2 Y_{t-2}+\cdots+\theta_p Y_{p-1}+e_t \tag{1}$$

式中,$\theta_i(i=1,2,\cdots,p)$为自回归系数,e_t为模型白噪声,Y_{t-i}为原始时间序列,Y_{par}为AR模型预测值。

定义后移算子为B,则

$$\begin{cases}BY_t=Y_{t-1}\\B^iY_t=Y_{t-i}\end{cases} \tag{2}$$

可得

$$Y_{\mathrm{par}}=\left(\theta_1B+\theta_2B^2+\cdots+\theta_pB^p\right)+e_t \tag{3}$$

MA模型称为移动平均模型,预测原理是用现时干扰及过去干扰有限项来预测现时值,q阶移动平均模型Y_{pma}表达式如下:

$$Y_{\mathrm{pma}}=\left(-W_1B-W_2B^2-\cdots-W_qB^q\right)e_t \tag{4}$$

式中:$W_j(j=1,2,\cdots,q)$为移动平均系数,Y_{pma}为MA模型预测值。

将AR模型和MA模型结合便可用来描述平稳随机过程的自回归移动ARMA(p,q)阶模型,数学表达式为

$$\begin{aligned}Y_{\mathrm{parma}}=&\left(\theta_1B+\theta_2B^2+\cdots+\theta_pB^p\right)+e_t+\\&\cdots+\left(-W_1B-W_2B^2-\cdots-W_qB^q\right)e_t\end{aligned} \tag{5}$$

应用ARMA时间序列模型进行RES功率及EV充电功率预测的流程如图1所示。

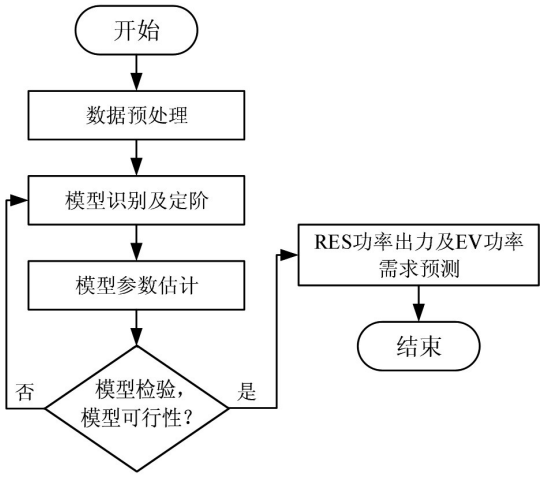


图1 ARMA功率预测流程图

1.2 考虑RES消纳的EV充放电优化

为了应对RES出力不确定性,本文提出了一种最优EV充/放电方法,通过最大限度地减少与RES失衡相关的处罚,并通过V2G在电力市场进行能源交易。超过计划发电量的RES用于为EV充电,EV停车后,可以通过V2G进行上网发电,以补偿供电不符合计划时的RES出力不足,EV优化目标函数如下:

$$F_{\mathrm{ev}}=\min\left(Pe_{\mathrm{res}}\right) \tag{6}$$

$$Pe_{\mathrm{res}}=\begin{cases}Pe_{\mathrm{res,up}},P_{\mathrm{res}}<P_{\mathrm{res,d}}\\Pe_{\mathrm{res,op}},P_{\mathrm{res}}\geqslant P_{\mathrm{res,d}}\end{cases} \tag{7}$$

式中,Pe_{res}为RES发电不满足调度要求时的惩罚项,$Pe_{\mathrm{res,up}}$,$Pe_{\mathrm{res,op}}$分别为RES出力不足和过剩的惩罚,P_{res},$P_{\mathrm{res,d}}$分别为RES实际出力和计划出力。根据FERC设定的递减和递增成本百分比公式,可得

$$Pe_{\mathrm{res,up}}(t)=1.1\cdot MCP(t)\cdot\left(P_{\mathrm{res,d}}(t)-P_{\mathrm{res}}(t)\right) \tag{8}$$

$$Pe_{\mathrm{res,op}}(t)=0.1\cdot MCP(t)\cdot\left(P_{\mathrm{res}}(t)-P_{\mathrm{res,d}}(t)\right) \tag{9}$$

式中，$MCP(t)$为电能t时刻的市场清算价格。通过满足运行要求提高RES利用率，以税收抵免的形式实现，如下所示：

$$R_{\mathrm{res}}(t)=P_{\mathrm{res}}(t)\cdot Ra_{\mathrm{tax}}\cdot\Delta t \tag{10}$$

式中，$R_{\mathrm{res}}(t)$为税收抵免收益，$\mathrm{Ra_{tax}}$为税收抵免率。

该模型可为EV提供清洁能源，防止RES发电商因过度生产而受到限制或惩罚。在可回收电能生产不足期间以更昂贵的结算价格交易储存的电能，实现双方目标。

$$R_{\mathrm{ev}}(t)=P_{\mathrm{V2G}}(t)\cdot MCP(t)\cdot\Delta t \tag{11}$$

式中，$R_{\mathrm{ev}}(t)$为t时刻EV车主收益，$P_{\mathrm{V2G}}(t)$是t时刻EV通过V2G技术上网的电能。

本文利用IPSO算法对EV充放电进行优化，建立了考虑RES消纳的EV优化调度模型。

1.3 基于运行目标的电容器选址定容优化

本节讨论了EV充放电调度对配电系统运行的潜在影响，主要包含EV充电导致的额外负载和系统损耗增加，以及放电时的电压越限问题。本文提出了一种电容器选址定容优化方法，最大限度地缓解电压越限和系统损耗。系统运行目标是将配电系统年运行成本降至最低，即

$$F_{\mathrm{operation}}=\min\left(C_{\mathrm{loss}}+\sum_i C_{\mathrm{Cap},i}+\sum_j Pe_{\mathrm{Vd},j}\right) \tag{12}$$

式中，C_{loss}是配电系统网损的年度总成本，$C_{\mathrm{Cap},i}$是电容器i的年化投资和维护成本之和，$Pe_{\mathrm{Vd},j}$是节点j的电压越限惩罚成本，电压越限的惩罚成本计算方法如下：

$$Pe_{\mathrm{Vd},j}=\begin{cases}Pe_{\mathrm{w}}\cdot\Delta V_j, V_{\min}\leqslant V_j\leqslant V_{\max}\\ Pe_{\mathrm{o}}\cdot\left(\Delta V_j-\Delta V_{\max}\right)+Pe_{\mathrm{w}}\cdot\Delta V_j, V_{\max}<V_j\\ Pe_{\mathrm{o}}\cdot\left(\Delta V_j-\Delta V_{\min}\right)+Pe_{\mathrm{w}}\cdot\Delta V_j, V_j<V_{\min}\end{cases} \tag{13}$$

式中，Pe_{w}和Pe_{o}是在可接受的电压范围内/外的越限惩罚因子，$\Delta V_j=|V_j-V_{\mathrm{rated}}|$。

以下给出配电系统中电容器选址定容的程序流程：(1)首先计算实际电容器列表中与每个目标馈线节点连接的最大电容器的电压越限和损耗成本；(2)选择成本降低最多的馈线节点作为电容器布置的最优候选者；(3)实际电容器列表中的每个电容器都连接到最优候选位置，并对其成本降低量进行评估。选择最能显著降低成本的电容器作为最佳电容器；(4)排除已经被选为候选者对应的节点，然后重复步骤(1)~(3)；(5)如果在所有节点都放置了电容器，或者新的安装位置无法进一步降低成本，则停止优化流程。

1.4 含EV及RES发电的配电网协同运行优化求解方法

将上述2个小节提出EV充放电优化方法和电容器选址定容方法进行整合，构建EV及RES发电的协同运行方法，同时解决市场和系统运行目标。本文采用三相不平衡潮流分析方法计算非均匀配电网的三相电压和损耗，采用IPSO算法进行模型求解。

PSO是模仿鸟类寻找食物的过程，其基本思想是将每个粒子作为一组可行解，利用目标函数判断粒子是否达到适应值，并通过粒子位置和速度的不断迭代获取最优解。迭代公式如下：

$$\begin{cases}v_i(t+1)=wv_i(t)+c_1r_1\left(P_{\mathrm{best}}(t)-x_i(t)\right)+\\ \qquad c_2r_2\left(G_{\mathrm{best}}(t)-x_i(t)\right)\\ x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t)\end{cases} \tag{14}$$

式中，w为惯性权重，c_1，c_2均为加速系数，$v_i(t)$为粒子i在第t次迭代的速度，r_1，r_2均为取值0~1的随机数，$P_{\mathrm{best}}(t)$为个体最优值，$G_{\mathrm{best}}(t)$为全局最优值。

惯性权重会直接影响算法收敛性能，与算法局部搜索能力相关，适当的w取值能够保证算法求解的速度和精度。不妨设种群粒子总数为n_{p}，则其平均适应度值$\overline{F}_{\mathrm{p}}$为

$$\overline{F_{\mathrm{p}}}=\sum_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}}F_i\Big/n_{\mathrm{p}} \tag{15}$$

式中，F_i为第i个粒子在迭代过程中的适应度值。

$$\Delta F=\left|F_{\max}-F_i\right| \tag{16}$$

式中，$F_{\max}$为种群中最优粒子的适应度值，ΔF可用于评估早熟收敛程度，该值越小，则算法越早熟收敛。

本文惯性权重取值方式如下：

$$\begin{cases}w=w_{\min} & f_i\geqslant\overline{F_{\mathrm{p}}}\\ w=1.5-1\Big/\left(1+m_1\cdot\mathrm{e}^{-m_1\Delta F}\right) & f_i<\overline{F_{\mathrm{p}}}\end{cases} \tag{17}$$

学习因子c_1值较大会使粒子易偏离最优粒子，c_2较大会使粒子易陷入局部最优，本文通过异步学习因子，使其随迭代次数进行更迭，提高收敛速度，改进公式如下：

$$\begin{cases}c_1=c_{1\mathrm{b}}+\dfrac{c_{1\mathrm{e}}-c_{1\mathrm{b}}}{t_{\max}}\cdot t\\ c_2=c_{2\mathrm{b}}+\dfrac{c_{2\mathrm{e}}-c_{2\mathrm{b}}}{t_{\max}}\cdot t\end{cases} \tag{18}$$

式中：$c_{1\mathrm{b}}$，$c_{2\mathrm{b}}$为学习因子初始值，$c_{1\mathrm{e}}$，$c_{2\mathrm{e}}$为学习因子迭代终值，$t_{\max}$，t分别为最大迭代次数和当前迭代次数。

算法具体流程如下：(1)输入数据，包括RES历史发电数据、配电系统发输电信息；(2)通过生成RES发电和每个EV车队的驾驶模式ARMA模型来表征不确定性；(3)应用EV充/放电优化方法，为EV车主及RES发电商提供经济收益；(4)评估EV调度对配电系统节点电压和

系统损耗的不利影响，采用电容器选址定容优化方法来改善系统损耗和电压偏差；(5)输出协同运行优化结果。

2 算例仿真

2.1 考虑RES消纳的EV充/放电仿真

将EV充/放电仿真优化方法应用于含484辆EV算例中，以最大限度地减少10 MW风电机组产能不足/过剩的惩罚因子。根据驾驶模式和插电模式的相似性，EV分为6个车队。采用蒙特卡罗模拟及ARMA功率预测方法生成1 000个不确定变量的样本，即风力和EV驾驶模式，以表征其随机性。在EV充/放电优化中，计算1 000个样本中每个EV集群的荷电状态(state of charge，SOC)。每个EV车队的每小时充/放电功率是通过计算连续2 h的平均SOC之间的差值来确定的。图2为EV充放电优化后的MCP值。图3为该算例24 h的优化结果，正值表示充电状态，负值表示放电状态。

2.2 考虑RES消纳的EV充放电优化对配电系统的影响

本小节对基于市场目标的EV充放电优化对配电系统运行的潜在不利影响进行评估。评估对象为某实际13.8 kV、134节点的配电网，系统基本参数和阻抗矩阵详见文献[15]。10 MW的风力发电容量在节点11、35、53、71、85和113均匀分配，为系统提供RES-DG资源。EV集群被分配到6个EV充电站，这些充电站依次与DG节点相连。

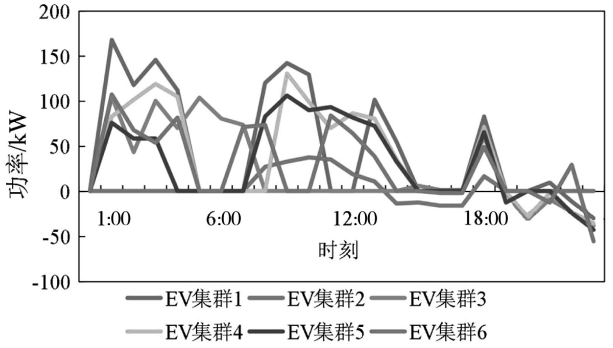


图2 基于市场目标的EV充放电优化结果

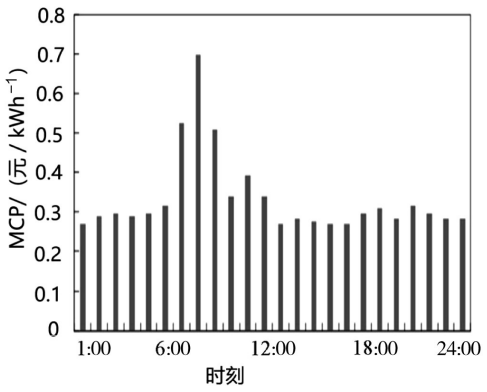


图3 EV充放电优化后MCP值

表1 系统仿真的三相潮流结果

时刻	P_a	P_b	P_c	Q_a	Q_b	Q_c	I_a	I_b	I_c	网损	U_{min}	U_{max}
1:00	4 253	4 238	4 130	1 962	1 920	1 878	579	573	558	698	0.919	0.991
2:00	4 185	4 170	4 065	1 860	1 820	1 777	564	559	544	664	0.925	0.994
3:00	4 417	4 401	4 288	2 013	1 968	1 924	601	595	579	751	0.914	0.989
4:00	5 099	5 076	4 939	2 408	2 352	2 297	706	698	678	1 036	0.884	0.973
5:00	4 623	4 604	4 484	2 136	2 088	2 041	633	626	609	832	0.905	0.984
6:00	4 852	4 831	4 703	2 303	2 250	2 201	671	663	644	935	0.894	0.977
7:00	4 261	4 245	4 138	1 957	1 915	1 873	579	574	558	700	0.919	0.991
8:00	4 221	4 206	4 099	1 927	1 885	1 843	573	567	552	685	0.921	0.992
9:00	4 363	4 347	4 237	1 991	1 947	1 904	593	587	571	733	0.916	0.990
10:00	4 264	4 249	4 143	1 921	1 879	1 836	577	572	557	694	0.921	0.992
11:00	4 111	4 097	3 994	1 838	1 799	1 758	554	549	535	640	0.927	0.996
12:00	4 268	4 252	4 145	1 939	1 897	1 854	579	573	558	700	0.920	0.992
13:00	4 363	4 347	4 236	1 998	1 954	1 910	594	588	572	736	0.916	0.989
14:00	4 497	4 480	4 364	2 069	2 023	1 978	614	607	591	784	0.910	0.987
15:00	3 923	3 909	3 812	1 758	1 722	1 684	528	523	510	582	0.934	0.999
16:00	4 630	4 611	4 490	2 183	2 134	2 088	637	630	612	843	0.903	0.982
17:00	5 321	5 294	5 148	2 602	2 540	2 482	746	737	715	1 156	0.871	0.966
18:00	5 532	5 504	5 349	2 692	2 626	2 564	777	766	744	1 254	0.863	0.962
19:00	5 483	5 455	5 301	2 703	2 637	2 577	772	761	739	1 239	0.867	0.962
20:00	5 075	5 052	4 914	2 450	2 392	2 339	707	698	678	1 037	0.883	0.972
21:00	4 030	4 016	3 915	1 833	1 794	1 755	545	540	526	620	0.929	0.996
22:00	3 980	3 966	3 867	1 803	1 765	1 727	537	532	518	603	0.931	0.997
23:00	3 323	3 313	3 235	1 434	1 405	1 374	440	437	426	406	0.958	1.012
24:00	2 750	2 744	2 682	1 122	1 101	1 074	358	356	347	271	0.980	1.024

注：有功功率p单位为kW，无功功率Q单位为kvar，电流I单位为A，电压V单位为p.u.

通过计算三相有功功率和无功功率、三相电流大小、系统损耗以及最小、最大电压，进行了不平衡三相潮流分析，以实现EV充放电优化对系统运行影响的评估。表1描述了系统仿真的潮流结果，18:00时系统出现了最坏的情况，由于最恶劣的负载情况，系统损耗和电压越限最高。针对最坏的负载情况，改变调度方式可确保系统在任何其他条件下安全可靠地运行，这是基于所提出的电容器选址定容优化方法实现的，这将在下节中进行叙述。

2.3 基于运行目标的电容器选址定容优化

本节基于所提出的电容器优化方法，以改善网损和电压偏差的目标来改变调度运行方式。保证节点电压在0.95~1.05 p.u.的可接受范围内不受惩罚，电压偏差超出可接受限值的节点将被分配500元/%的惩罚系数。用于此优化的电容器列表参数如表2所示。

表2 用于优化的电容器列表参数

容量/kVar	年化总成本/元	接线方式
600	70 000	三相星形
900	78 000	三相星形
1 200	85 000	三相星形
1 500	92 000	三相星形

表3为18:00时的配电系统优化结果，最佳解决方案是在节点26、84、112、118和127上安装5个1 200 kVar的电容器组，以增强系统运行工况，该方案有效降低了系统损耗和电压越限惩罚。

表3 电容器优化后第18小时的配电系统优化结果

电容器优化	网损成本	电压越限成本	电容器成本	总成本	节约成本
优化前	3 517 489	1 445 978	0	4 963 467	0
优化后	2 534 387	0	425 000	2 959 387	2 004 080

2.4 含EV及RES发电的配电网协同运行优化

本节进行了不平衡潮流研究，以评估电容器安装后24 h仿真期内的系统运行情况。表4提供了三相潮流结果，可见EV及RES发电协同优化后，系统网损得到了削减，节点电压趋于稳定，满足了RES消纳目标和系统运行目标，促进了配电系统安全可靠运行。

本节分别采用遗传算法(genetic algorithm，GA)和PSO算法对本文模型进行求解，与IPSO性能对比，其结果如表5所示。可知，IPSO算法的收敛速度、求解时间和寻优能力都优于常规GA和PSO算法，可变权重及异步学习因

表4 协同运行优化后系统仿真的三相潮流结果

时刻	P_a	P_b	P_c	Q_a	Q_b	Q_c	I_a	I_b	I_c	网损	U_{min}	U_{max}
1:00	4 202	4 193	4 092	1 941	1 873	1 791	528	511	501	586	0.972	1.022
2:00	4 146	4 130	4 040	1 051	1 025	953	518	514	500	560	0.964	1.019
3:00	4 360	4 340	4 250	776	755	667	533	530	516	598	0.971	1.026
4:00	5 006	4 977	4 877	764	742	625	611	606	590	783	0.961	1.023
5:00	4 560	4 538	4 443	911	886	794	562	558	543	663	0.962	1.021
6:00	4 768	4 741	4 647	645	626	514	579	574	559	705	0.970	1.027
7:00	4 199	4 179	4 098	253	242	143	501	498	486	531	0.992	1.041
8:00	4 160	4 141	4 060	220	209	110	496	493	481	521	0.994	1.042
9:00	4 298	4 277	4 195	292	280	179	514	510	498	557	0.989	1.040
10:00	4 213	4 195	4 108	677	658	571	512	509	496	551	0.977	1.029
11:00	4 062	4 045	3 962	586	569	485	492	489	476	508	0.982	1.033
12:00	4 215	4 197	4 110	696	676	590	513	510	496	555	0.976	1.029
13:00	4 307	4 287	4 199	759	739	651	526	523	509	583	0.972	1.026
14:00	4 438	4 417	4 325	838	815	726	545	541	526	623	0.968	1.023
15:00	3 888	3 873	3 789	942	919	852	483	479	467	488	0.972	1.023
16:00	4 566	4 543	4 447	961	935	844	564	560	545	668	0.960	1.019
17:00	5 203	5 167	5 069	513	495	358	628	623	607	830	0.968	1.029
18:00	5 355	5 317	5 217	628	608	466	650	644	627	888	0.962	1.025
19:00	5 405	5 366	5 264	619	598	455	656	650	632	904	0.961	1.025
20:00	4 981	4 951	4 851	807	783	669	610	604	588	779	0.960	1.022
21:00	3 982	3 965	3 884	579	563	481	482	479	467	489	0.984	1.033
22:00	3 944	3 929	3 843	989	966	898	491	488	475	505	0.969	1.022
23:00	3 308	3 298	3 226	1 027	1 005	959	418	415	404	366	0.978	1.024
24:00	2 740	2 706	2 646	1 085	1 062	1 019	314	311	300	224	0.989	1.027

注：有功功率p单位为kW，无功功率Q单位为kvar，电流I单位为A，电压V单位为p.u.

（下转第125页）