DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190775

基于直流微网的电力分组传输调度

杜 娟[1]，安世华[1]，魏明磊[1]，高 冰[1]，赵志辰[1]，王梦媛[2]，李保罡[2]

(1. 国网衡水供电公司，河北 衡水 053000；2. 华北电力大学电气与电子工程学院，河北 保定 071003)

摘要：可再生能源的大范围渗透使得直流微网逐步受到重视。针对新能源供电，直流微网可以减少交直流变换时的损耗以及不稳定性。因此，在直流微网环境下，构建销售商为领导者和用户为跟随者的多主从博弈模型，对销售商价格与用户需求量进行博弈，并根据分布式选择算法得到多个销售商-用户匹配对。基于两个通道传输损耗不同的路由器，通过遗传算法实现了多个匹配对的最优电力分组调度。仿真结果验证了上述两种算法的可行性以及优越性。

关键词：可再生能源；直流微网；主从博弈；分布式选择算法；遗传算法

Power packet transmission scheduling based on a DC microgrid

DU Juan[1], AN Shihua[1], WEI Minglei[1], GAO Bing[1], ZHAO Zhichen[1], WANG Mengyuan[2], LI Baogang[2]

(1. State Grid Hengshui Power Supply Company, Hengshui 053000, China;
2. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The large-scale penetration of renewable energy has promoted great attention on the DC microgrid. For the supply of new energy, the DC microgrid can reduce loss and instability of AC/DC conversion. Therefore, in the DC microgrid environment, a multi-master-slave game model which regards the sellers as the leaders and the users as the followers is constructed. Then a game analysis for the seller's price and user's demand is carried out and finally multiple seller-user pairs can be obtained according to the distributed selection algorithm. Based on two routes with different transmission losses of channels, the optimal power packet scheduling of multiple matched pairs is realized by genetic algorithm. Simulation results demonstrate the feasibility and superiority of the two proposed algorithms.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61501185) and Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (No. SGHEHS00FCJS1800274).

Key words: renewable energy; DC microgrid; master-slave game; distributed selection algorithm; genetic algorithm

0 引言

智能电网利用电力和信息的双向流动，创建了一个自动化、分布式的先进能源输送网络，实现了用户和电力公司之间的双向互动，即用户可以获得电价情况和电能质量信息，以便合理用电；电力公司可以观察用户的用电状况，为用户提供更多便捷服务和优惠政策[1-4]。然而，随着可再生能源在电网中的应用，由于可再生能源和电网负荷均具有波动性，会导致电网运行不稳定和供电不可靠。另一方面，家庭中的许多负载大多以直流形式运行，而传统电网为交流配电模式，因此，为了减少交直流转换时的电力损耗，直流配电系统的应用是至关重要的[5-8]。针对上述问题，一种新型直流电力分组调度系统被提出以实现更高效和更可靠的能源分配，该系统以电力包的形式传输电力，可以实现精准、定时供电[9-12]。

电力分组调度系统包括多个源、混频器、路由器和多个负载。其中，混频器和路由器控制电力线网络中的电力包流量，每个源、负载、混频器和路由器都各自有唯一的地址。直流电源输出的电力经过混频器中的开关转换成电力包，进而通过电力线传输给路由器，路由器接收到电力包后会读取包的头部和尾部，根据头部中包含的地址，将电力包转发至目标负载[13-16]。文献[17]中对混频器进行了优

基金项目：国家自然科学基金项目资助(61501185)；国网河北省电力有限公司科技项目资助(SGHEHS00FCJS1800274)

化，在混频器中使用单电感多输入单输出转换器，实现了从多个源分享电力以生成电力包，从而利用了更多可再生能源；同时，该混频器中的电感可以平滑电力并将电力包的电压水平调节到正确水平。文献[18]提出一种本地局域电力包网络，利用单个核心路由器实现对多个电力包的有效调度。文献[19]在级联网络化电力分组分配系统中通过多个路由器将电力包准确转发至目标负载，验证了电力分组分配网络的可行性。

在之前的电力需求供应文献中均未考虑电力如何传输，未实现精准供电，所以可将电力分组调度系统的思想应用其中，考虑将电能打包，在电能上附加头部和尾部信息标签，当供应端将电力包通过电力线传送到路由器后，路由器根据信息标签转发电力给相应的用户，实现电力供应。但由于单个路由器的容量有限，可能会出现一些传输任务等待的情况，等待时间越长，传输效率会越低。因此，本文考虑利用两个路由器传输任务，以便更高效传输电力。但是，由于不同的路由器有不同的传输损耗，故为提高传输效率，及时满足用户需求，路由器的选择是本文的研究重点。

直流微网可提高供电可靠性，节省能源，将是未来配用电系统的重要发展趋势[20-22]。本文基于含可再生能源的微网，考虑了多个销售商与多个用户之间的电力供需问题。首先，以销售商为领导者和用户为跟随者建立了主从博弈模型，证明了均衡解的存在性，并采用分布式选择算法进行求解，得到多个最佳电力供应需求匹配对。其次，对两个路由器如何为匹配对选择通道问题进行规划，并利用遗传算法求解该问题。最后，利用 Matlab 仿真软件对算法进行了分析及验证。

1　系统模型

本文主要研究一个含有多个销售商和多个用户的微网，如图 1 所示。该系统模型包括调度控制中心、多个可再生能源工厂、多个销售商、多个用户、两个通道传输损耗不同的路由器，每个路由器中含有多个通道。其中，不同的可再生能源工厂表示利用不同的可再生能源，这些可再生能源工厂以直流形式输出电力，销售商根据就近原则选择其中一个可再生能源工厂购电。销售商和用户先将自己的销售电量、售电价和需求电量上传到调度控制中心，再各自调整自己的策略，直至均获得最大收益，形成最优匹配对。之后调度控制中心对这些匹配对选择合适的路由器，路由器为匹配对选择通道，销售商再以电力包的形式为用户传输电力。

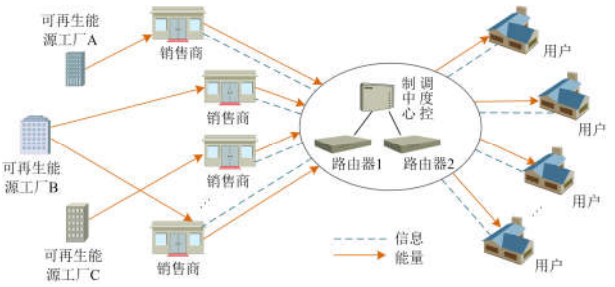

图 1　系统模型架构

Fig. 1 System model architecture

电力包结构如图 2 所示，纵坐标表示一个电力包的电压等级，横坐标表示电力包的持续时间长度。一个电力包包括头部、有效载荷、尾部三部分，头部和尾部作为信息标签附加在有效载荷两侧。头部信息标签包括电力包的开始信息、源地址和目的地址信息，尾部用于识别电力包是否传输结束。有效载荷表示从特定电源传输的电力，包中供应的电力量可通过改变有效载荷的持续时间来调节。在本文中，电力包头部信息携带的是销售商地址和用户地址，路由器会根据其信息将电力包转发至相应用户。每个电力包所携带的电力量为：$W = UIt$，t 为电力包的有效载荷持续时间长度，U 为电力包的电压等级，I 为传输电力包的电流。

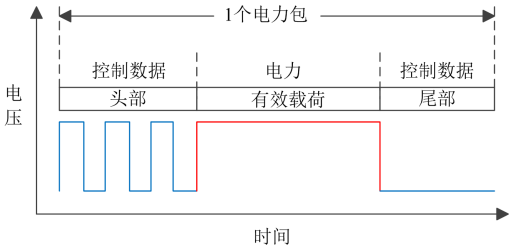

图 2　电力包结构

Fig. 2 Power packet structure

2　主从博弈

主从博弈是指参与双方根据对方可能的策略来不断调整自身的策略，最终得到各自的最优策略，达到纳什均衡，以实现双方各自利益最大化。本文中，用户基于其需求电力紧急性和购电成本来达到利益最大化，而销售商通过调整其售电价及购买电力量实现其利益最大化。因此，可采用主从博弈的思想考虑两者之间的关系：销售商作为领导者，用户作为跟随者，领导者先给出其售价及从电网购电的成本，跟随者对此做出最优回应，即最优电力需求量；继而领导者再根据跟随者的决策调整其售价。重复上述过程，直至各自利益均达到最大化。

2.1 用户福利函数

用户集合为 $A=\{1,2,\cdots,a\}$，销售商集合为 $B=\{1,2,\cdots,b\}$。D_i 表示第 i 个用户的电力需求量，P_j 表示第 j 个销售商的单位价格。其中，$i\in A$，$j\in B$。用户效用函数主要体现在用户用电的满意度上，可描述为

$$V(D_i)=\theta D_i-\frac{\eta}{2}D_i^2\quad \theta,\eta>0 \tag{1}$$

式中：θ 表示不同用户对电量的需求程度；η 为已给定的参数。

因此，各用户关于福利函数的优化问题如下：

$$\max F_i=V(D_i)-P_jD_i \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\quad D_i\ge D_i^{\min} \tag{3}$$

式中，$D_i^{\min}$ 表示满足该用户正常工作的最低电量。

上述问题为严格凸优化问题，故有唯一的最优解。对用户的福利函数进行一阶求导，并令其为零，可得用户的最优电力需求量：

$$D_i(P_j)=\frac{\theta-P_j}{\eta} \tag{4}$$

2.2 销售商效用函数

p 表示销售商从可再生能源工厂购电价格，各可再生能源工厂的售价相同。各个销售商的效用函数可表示为

$$Z(D_j,P_j)=D_jP_j-R_jp \tag{5}$$

$$\text{s.t.}\quad D_i\le D_j(1-\alpha_{\max}) \tag{6}$$

式中：D_j 表示第 j 个销售商供应给第 i 个用户的电量；R_j 表示从可再生能源工厂所购买的电量。式(6)表示销售商需考虑其供应的电量经过传输之后可以满足用户的需求。其中，$\alpha_{\max}$ 为最大传输损耗系数，$\alpha_{\max}=\max(\alpha_1,\alpha_2)$，$0<\alpha_1<0.5$，$0<\alpha_2<0.5$。$\alpha_1$、$\alpha_2$ 的具体定义在第三节中详细给出。

2.3 均衡解的存在性

对 F_i 进行二阶求导，可得：

$$\frac{\partial^2F_i}{\partial D_i^2}=-\eta<0 \tag{7}$$

根据函数极值定理，函数在某点处一阶导数为0，二阶导数小于0，则该点为极大值点。所以当用户的电力需求量为式(4)时，其福利函数值最大。因此，对于给定的售价，用户均有一个最优电力需求量。

销售商的效用函数存在拟凹性是纳什均衡解存在的充分条件[23]。对 $Z(D_j,P_j)$ 求一阶导之后，得

$$\frac{\partial Z(D_j,P_j)}{\partial P_j}=\frac{\theta-2P_j}{\eta(1-\alpha_{\max})} \tag{8}$$

二阶求导之后，得

$$\frac{\partial^2Z(D_j,P_j)}{\partial P_j^2}=-\frac{2}{\eta(1-\alpha_{\max})}<0 \tag{9}$$

由式(9)可知，销售商的效用函数具有拟凹性，博弈的纳什均衡解存在。

2.4 主从博弈模型求解

由于销售商与用户比较注重其个人隐私信息，所以彼此之间不知道各自的策略空间和效用函数。本文采用分布式选择算法对该模型进行求解。

销售商价格求解过程如下。

步骤 1：令 $k=1$，在销售商策略中任意选择一个销售商的初始售价 P_j，$j\in B$；

步骤 2：根据式(4)对 i 个用户依次求解其最优电力需求量；

步骤 3：将各个用户的最优电力需求量上传到销售商 j；

步骤 4：通过式 $P_{j,k+1}=P_{j,k}+\dfrac{\sum_{i\in B}D_i-R_j}{\sigma}$（$\sigma$ 为非常大的正数，可以调整算法的收敛速度)计算 $P_{j,k+1}$；

步骤 5：重复上述步骤，直至 $P_{j,k+1}=P_{j,k}$ 时，该算法停止，得各用户的最优电力需求量和销售商 j 的最优售价；

步骤 6：在销售商策略中重新选择售价，再次执行上述步骤。

用户选择销售商过程如下：用户根据每个销售商的最优售价及在该售价下的最优电力需求量按式(2)求解福利函数值，选择使自身福利函数值最大的销售商为其供应电力。若在两个销售商下的福利函数值相同，则随机选择一个销售商。

3　电力包传输调度

上一节通过构建主从博弈模型得到最优匹配对集合 $H=\{1,2,\cdots,h\}$，之后需要路由器为其选择通道以传输电力。本节主要考虑如何通过两个路由器进行电力调度问题，使系统中的电力损耗量达到最小化。不同路由代表不同路径，将路径损耗归结为路由器损耗，两个路由器中除电力传输损耗系数和最大容量不同之外，其余配置和参数都相同。为简便分析，一个路由器中各个通道的电力传输损耗系数是一致的，路由器 Q_1 的通道传输损耗系数为 α_1，路由器 Q_2 的通道传输损耗系数为 α_2，且 $\alpha_1<\alpha_2$。路

由器Q_1的电力通道数为$M=\{1,2,\cdots,m\}$，每个通道的最大容量为$P_{\max}$，Q_1的最大容量可表示为：$C_{\max}^1=mP_{\max}$。路由器Q_2的电力通道数为$N=\{1,2,\cdots,n\}$，每个通道的最大容量为$P_{\max}$，Q_2的最大容量可表示为：$C_{\max}^2=nP_{\max}$。电力通道数大于匹配对数的情况在这里将不作讨论，本文主要考虑电力通道数小于匹配对数的情况，即条件满足：$m\le n<h$。

3.1 调度问题规划

从实际角度考虑，路由器调度过程中必然存在一定的电力损耗，电力损耗量的多少对用户有着至关重要的影响，损耗量过多会导致用户接收的电力量不足，从而无法满足其正常使用，对用户造成不适的体验。由于匹配的对数大于路由器中的通道数，所以会出现一些匹配对在等待的情况，可以用等待时间$t_{\mathrm{off}h}^{\tau}$来表示。$t_{\mathrm{off}h}^{\tau}$表示第h对在电力传输之前的等待时间，而$\tau=\{1,2\}$，表示是在路由器Q_1还是路由器Q_2中等待电力传输。因此，为了实现传输过程中的电力损耗量最小，本文提出一个代价函数，即电力损耗量代价和等待时间代价之和：

$$w_h=\beta\alpha_\tau E_h+\gamma t_{\mathrm{off}h}^{\tau}p_U \tag{10}$$

式中：β为损耗代价，其值是固定的；E_h表示销售商输出的能量；D_h表示用户需求的能量；α_τ表示路由器的损耗系数；γ为等待时间代价，其值给定；p_U为每个用户自身电功率，即单位时间内消耗的电能，每个用户的电功率是一定的。

电力传输调度问题可以规划为

$$\min\sum_{h\in H}(\kappa_1 w_h+\kappa_2 w_h) \tag{11}$$

$$\text{s.t. } E_h\left(1-\alpha_\tau\right)\ge D_h\left(0<\alpha_\tau<0.5\right) \tag{12}$$

$$\alpha_1<\alpha_2,\ C_{\max}^1\le C_{\max}^2 \tag{13}$$

$$m\le n<h \tag{14}$$

$$\sum_{h\in H}E_h\le C_{\max}^1 \tag{15}$$

$$\sum_{h\in H}E_h\le C_{\max}^2 \tag{16}$$

$$E_h\le P_{\max} \tag{17}$$

式中：$\kappa_1=\{0,1\}$，$\kappa_2=\{0,1\}$，且满足条件$\sum_{\tau=1}^{2}\kappa_\tau=\{1\}$。即表示每个匹配对只能在一个路由器中传输。

上述该问题中，式(11)为优化目标，即系统中总电力损耗量需达到最小；式(12)表示损耗之后的电力量必须满足用户的最低需求；式(13)为路由器的参数约束，这一条件关系到如何对电力进行有效分配的问题；式(14)表示单个路由器中的通道数不足以传输所有的匹配对，从而会出现一些匹配对等待的情况；式(15)和式(16)表示传输的所有匹配对的总能量既不能超过路由器Q_1的最大容量限制，也不能超过路由器Q_2的最大容量限制，同时也确保了单个路由器中所传输的匹配对的能量不会超过该路由器的最大容量；式(17)保证了每个销售商供应的电力量不能超过单个通道的最大容量。

该调度问题为非线性约束整数规划问题，所以可用遗传算法来解决。

3.2 遗传算法调度

遗传算法是一种模拟自然界生物进化过程的大范围搜索最优解的优化算法，在调度优化方面已经有了广泛的应用。遗传算法的要素主要包括染色体编码、种群初始化、适应度函数、染色体交叉、变异等[24-26]。本文将每一个匹配对的排列顺序看作一个基因，则h个匹配对的排列顺序为一个染色体，通过计算适应度函数以及一系列进化来获得最优调度顺序。具体实现步骤如下。

步骤 1：对染色体进行编码时，将每一对先随机进行排列，并将不同顺序的染色体从 1 开始依次往后编号。种群初始化过程中，随机产生一个具有X个染色体的种群。

步骤 2：在解决该电力传输调度问题中，可选用式(11)的倒数，即式(18)作为适应度函数，总的电力损耗量越小，适应度函数值越高，表示该个体的适应度越好。

$$f=\frac{1}{\sum_{h\in H}(\kappa_1 w_h+\kappa_2 w_h)} \tag{18}$$

步骤 3：在种群中选择第l个染色体，并计算该染色体的适应度值与X个染色体适应度值和的比值，即式(19)。利用轮盘赌法，将比值高的染色体保留下来。若比值相同时，选择匹配对等待时间较短的染色体。为简便分析，选择其中比值较高的两组染色体作为接下来的研究对象。

$$P_l=\frac{f_l}{f_1+f_2+f_3+\cdots+f_X},\quad l=1,2,3,\cdots,X \tag{19}$$

步骤 4：将上述两组染色体分别作为父系染色体和母系染色体，按照一定的概率对其进行均匀交叉，选取对应的交叉点位置，双方交换相应的基因。此时可能会出现两组染色体中分别出现重复的基因，将两组中未进行交叉的重复基因进行互换，得到两组新的染色体。

步骤 5：基于上一步骤，根据一定的概率对新

的染色体进行单点变异，即直接对两个基因进行交换。

步骤 6：按照上述的原理对多组染色体进行选择、交叉、变异之后，将最后得到的种群作为新的初始种群，再次循环上述过程，直至最优适应度函数值在给定的迭代次数内保持不变或者当迭代次数达到最大值保持不变时，该算法终止。此时该条染色体即为输出的最优匹配对调度顺序。

4　仿真结果

4.1 主从博弈均衡

在仿真模拟中，本文假设参与双方为三个销售商和三个用户，每个用户根据销售商的初始售价确定自己的最优需求量，各销售商再根据用户的最优需求量调整自己的售价，最终双方达到均衡。仿真参数设置为 θ_1=4，θ_2=3，θ_3=2，η=0.3，$p_1=0.7$，$p_2=0.6$，$p_3=0.3$。三个销售商购买电量为 $R_1=15$，$R_2=20$，$R_3=25$。算法迭代 30 次之后销售商的收敛电价如图 3 所示。从图 3 中可以看出，不同的销售商售价在迭代一定次数后价格为一固定值，表示达到均衡。

算法进行迭代之后用户的最优需求量如图 4 所示。用户基于销售商售价确定自己的最优需求量，随着迭代次数的增加，用户需求量逐渐趋于一定值，该定值即为最优需求量。图 3 和图 4 证明提出的算法具有收敛性。

4.2 调度方法比较

本小节采用随机调度方法和遗传算法调度方法对匹配对进行调度，对比了两种方法对电力损耗量的影响。假设每个路由器各有三个通道，路由器 Q_1 的通道传输损耗系数为 $\alpha_1=0.05$，路由器 Q_2 的通道传输损耗系数为 $\alpha_2=0.1$，损耗代价 β=4，等待时间代价 $\gamma=3$。随机调度方法即哪个路由器通道有空闲，便利用该通道传输电力。遗传算法中交叉概率为 0.8，变异概率为 0.02。两种方法下的电力损耗量如图 5 所示。从图 5 中可以看出，随着调度匹配对数的增加，电力损耗量也会增加。同时可看出遗传算法调度之后的电力损耗量小于随机调度后的电力损耗量，该结果证实了遗传算法的优越性。

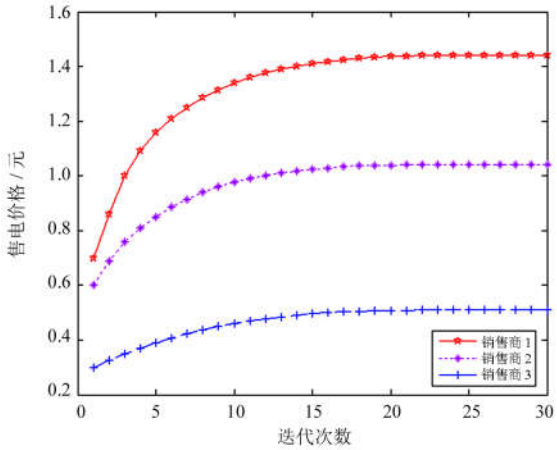

图 3 销售商的售电价格

Fig. 3 Seller's electricity price

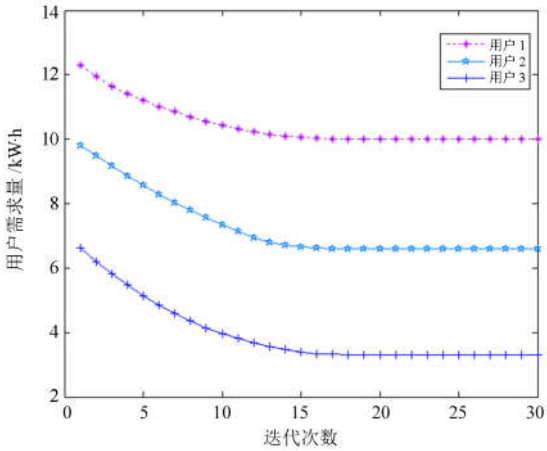

图 4 用户最优需求量

Fig. 4 User's optimal demand

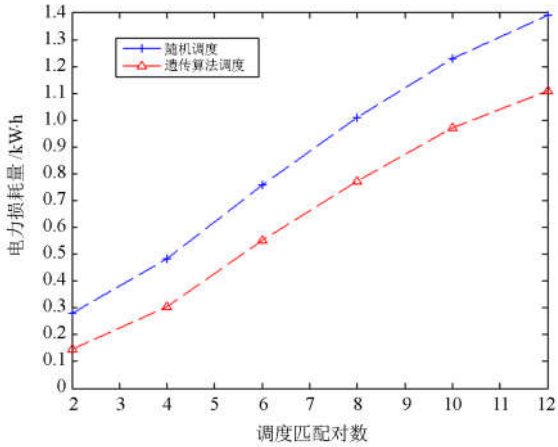

图 5 调度方法比较

Fig. 5 Comparison of scheduling methods

5　结论

在智能电网环境下，本文对多个销售商与多个用户之间的电力供需和电力调度问题进行了研究。建立了销售商与用户之间的主从博弈模型，销售商作为上层领导者，用户作为下层跟随者，利用分布式选择算法求解出最优电价和最优需求量。仿真结果证实了该算法具有收敛性。基于得到的销售商-用户匹配对，利用遗传算法对电力传输调度问题进行了规划，并以电力包的形式实现了定量供电。结

果表明遗传算法调度有效减少了电力损耗。这一研究以电力包的新兴方式实现了电力供需问题，定时精准供应电量，一定程度上节省了能源。由于本文假设传输信息的信道是理想信道，不会发生信息丢失。但是在实际场景中，用户发送的需求量请求信息可能会与销售商接收到的需求量信息不一致，进而影响双方之间的相互服务。因此，在之后的研究中，还应该把请求信息误差考虑进去。

参考文献

[1] WANG K, LI H, MAHARJAN S, et al. Green energy scheduling for demand side management in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Green Communication Network, 2018, 2(2): 596-611.

[2] 乔林, 刘颖, 刘为. 智能电网中应用电力大数据初探[J]. 电子世界, 2019(4): 36-37.
QIAO Lin, LIU Ying, LIU Wei. A preliminary study on the application of power big data in smart grid[J]. Electronics World, 2019(4): 36-37.

[3] 许文杰, 张晓力, 彭博涵, 等. 浅析发展智能电网的重要意义[J]. 科技风, 2019(11): 82.
XU Wenjie, ZHANG Xiaoli, PENG Bohan, et al. Analysis on the significance of developing smart grid[J]. Science and Technology Wind, 2019(11): 82.

[4] 杨浩, 李瑞琪, 冯丽丽. 电力信息通信技术在智能电网的应用[J]. 集成电路应用, 2019, 36(6): 64-65.
YANG Hao, LI Ruiqi, FENG Lili. Application of power information and communication technology in smart grid[J]. Application of Integrated Circuit, 2019, 36(6): 64-65.

[5] 管志成, 丁晓群, 郑能, 等. 计及需求侧资源的主动配电系统两阶段优化调度[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 14-21.
GUAN Zhicheng, DING Xiaoqun, ZHENG Neng, et al. Two-stage optimal dispatch of active distribution system considering demand-side resources[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 14-21.

[6] 白冰, 崔赫, 王姝惠, 等. 直流配电网研究现状与展望[J]. 科技创新导报, 2018, 15 (11): 60-62.
BAI Bing, CUI He, WANG Shuhui, et al. Research status and prospects of DC distribution network[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(11): 60-62.

[7] 唐京瑞, 段勋兴, 汤东, 等. 直流配电网在智慧城市中的研究[J]. 通信电源技术, 2018, 35(11): 131-132.
TANG Jingrui, DUAN Xunxing, TANG Dong, et al. Research and prospect of DC distribution network in smart city[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(11): 131-132.

[8] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48.

[9] 徐铭铭, 王鹏, 高明春. 基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 103-109.
XU Mingming, WANG Peng, GAO Mingchun. A fault location algorithm for the single-pole-to-ground fault of DC distribution network based on power flow calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 103-109.

[10] 李保罡, 晏彬洋, 董若南, 等. 直流电力分组传输技术研究综述与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 989-997.
LI Baogang, YAN Binyang, DONG Ruonan, et al. Review and prospect of DC power packet transmission technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 989-997.

[11] TAKUNO T, KOYAMA M, HIKIHARA T. In-home power distribution systems by circuit switching and power packet dispatching[C] // 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, MD, USA: 427-430.

[12] TAKAHASHI R, AZUMA S I, HIKIHARA T. Power regulation with predictive dynamic quantizer in power packet dispatching system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7653-7661.

[13] ARAUMI R, ASADA K, YOKOYAMA T. An experiment on lighting control of LEDs by power packet dispatching system[C] // 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), June 3-7, 2017, Kaohsiung, Taiwan, China: 1120-1125.

[14] FUJII N, TAKAHASHI R, HIKIHARA T. Networked power packet dispatching system for multi-path routing[C] // 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, December 13-15, 2014, Tokyo, Japan: 357-362.

[15] TAKAHASHI R, AZUMA S I, TASHIRO K, et al. Design and experimental verification of power packet generation system for power packet dispatching system[C] // 2013 American Control Conference, June 17-19, 2013, Washington, DC, USA: 4368-4373.

[16] TASHIRO K, TAKAHASHI R, HIKIHARA T. Feasibility of power packet dispatching at in-home DC

distribution network[C] // 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), November 5-8, 2012, Tainan, Taiwan, China: 401-405.

[17] TAKAHASHI R, AZUMA S I, HIKIHARA T. Power regulation with predictive dynamic quantizer in power packet dispatching system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7653-7661.

[18] REZA C M F S, LU D D C, QIN L. Single-Inductor multiple-source mixer for DC power packet dispatching system[C] // 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), June 27-29, 2017, Nuremburg, Germany: 553-557.

[19] MA J, SONG L, LI Y. Optimal power dispatching for local area packetized power network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4765-4776.

[20] TAKAHASHI R, TASHIRO. K, HIKIHARA T. Router for power packet distribution network: design and experimental verification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 618-626.

[21] 李世亮. 直流微电网在直流配电网中的应用研究[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2017(9): 156-157.
LI Shiliang. Research on the application of DC micro-grid in DC distribution network[J]. Urban Construction Theory Research: Electronic Edition, 2017(9): 156-157.

[22] 朱永强, 唐萁. 交直流混合微电网可靠性影响因素分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 11-15.
ZHU Yongqiang, TANG Qi. Analysis of factors affecting reliability of hybrid AC/DC microgrid[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 11-15.

[23] 杨燕华, 曼苏乐. 基于通信网络的直流微网分布式协同控制[J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 34-36.
YANG Yanhua, MAN Sule. Distributed cooperative control of DC micro grid based on communication networks[J]. Electrical Automation, 2018, 40(5): 34-36.

[24] 高海力, 谭建成. 直流微网技术及发展动态[J]. 电气开关, 2018, 56(4): 8-12.
GAO Haili, TAN Jiancheng. DC micro grid technology and future trends[J]. Electrical Switch, 2018, 56(4): 8-12.

[25] 王颂, 唐鹏晨. 基于信息不对称视角下的传统村落建设融资博弈分析[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2019, 32(2): 340-344.
WANG Song, TANG Pengchen. Game analysis of traditional village construction financing based on asymmetric information[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2019, 32(2): 340-344.

[26] 吴诚, 高丙团, 汤奕, 等. 基于主从博弈的发电商与大用户双边合同交易模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 56-62.
WU Cheng, GAO Bingtuan, TANG Yi, et al. Master-slave game based bilateral contract transaction model for generation companies and large consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 56-62.

[27] 鲍劲松, 李志强, 周亚勤. 基于遗传算法的舰载装备多目标作业调度优化研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 901-908.
BAO Jinsong, LI Zhiqiang, ZHOU Yaqin. Multi-objective operation scheduling optimization of shipborne-equipment based on genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 901-908.

[28] 江卓翰, 何禹清, 曹丽璐, 等. 基于改进遗传算法的含分布式电源和储能装置配电系统网络重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 68-72.
JIANG Zhuohan, HE Yuqing, CAO Lilu, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations and energy storing devices based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 68-72.

[29] 宣贺君, 向勇, 和晓强, 等. 联合火力打击中武器目标分配问题的多目标优化模型及算法[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2019, 32(4): 664-669.
XUAN Hejun, XIANG Yong, HE Xiaoqiang, et al. Multi-objective optimization model and algorithm for weapon-target assignment problem in joint fire strike[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2019, 32(4): 664-669.

[30] 李岩, 袁弘宇, 于佳乔, 等. 遗传算法在优化问题中的应用综述[J]. 山东工业技术, 2019(12): 242-243, 180.
LI Yan, YUAN Hongyu, YU Jiaqiao, et al. Application review of genetic algorithm in optimization[J]. Shandong Industrial Technology, 2019(12): 242-243, 180.

收稿日期：2019-07-04；　　修回日期：2019-12-05

作者简介：

杜　娟(1982—)，女，学士，工程师，主要从事调度自动化系统、智能电网技术方面的工作。E-mail: dlkygb@163.com

(编辑　周金梅)