

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190835

直流电力分组传输中超级电力包的设计

杜娟¹, 郭文利², 赵志辰¹, 高冰¹, 王彬¹, 张倩³, 李保罡³

(1. 国网衡水供电公司, 河北 衡水 053000; 2. 河北雄安许继电科综合能源技术有限公司, 河北 雄安 050000;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 直流电力分组调度系统实现了电能的按需分配。然而, 由于是在单个配电线上传输, 如何节省传输时间成为一个重要问题。着重对直流电力分组传输系统中的电力包结构进行了分析, 提出一种超级电力包的概念, 将多个电力包合为一个超级电力包进行输配电。考虑到负载对于电力需求的多少是不相同的, 在超级电力包的基础上, 又提出一种可调节超级电力包的概念, 能够控制转发给负载各自需要的电力。另外, 在合成超级电力包时, 根据负载需求电力的紧迫性和数量设计了电力分配启发式算法。最后, 使用 Matlab 软件对超级电力包的时间关系式和电力分配算法进行了仿真分析。结果表明, 通过超级电力包进行输配电能够节省传输时间, 另外, 按启发式算法合成的超级电力包能够满足更多用户的需求。

关键词: 直流电力分组传输; 超级电力包; 负载; 启发式算法; 优先规则

Design of a super power packet in DC power packet transmission

DU Juan¹, GUO Wenli², ZHAO Zhichen¹, GAO Bing¹, WANG Bin¹, ZHANG Qian³, LI Baogang³

(1. State Grid Hengshui Electric Power Supply Company, Hengshui 053000, China; 2. Hebei Xiong'an XJ Electric Power Integrated Energy Technology Co., Ltd., Xiong'an 050000, China; 3. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The DC power packet scheduling system achieves on-demand allocation of electrical energy. However, since it is transmitted on a single distribution line, how to save transmission time becomes an important issue. This paper focuses on the analysis of power packets in DC power packet transmission systems, and proposes a concept of super power packets. This combines multiple powers into one super power packet for transmission and distribution. Considering that the load is different for different power demand, on the basis of the super power packet, a concept of an adjustable super power packet is proposed. This can control the power required to be forwarded to the load. In addition, when synthesizing the super power packet, the power distribution heuristic algorithm is designed according to the urgency and the power of the load demand power. Finally, Matlab software is used to simulate the time relationship and power distribution algorithm of the super power packet. The results show that transmission and distribution through the super power packet can save transmission time, and the super power packet under the heuristic algorithm can meet the needs of more users.

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: DC power packet transmission; super power packet; load; heuristic algorithm; priority rule

0 引言

由于化石燃料等能源的数量是有限的, 必须消耗更少的能源, 另外目前碳排放量过多, 因此煤炭、

石油、天然气等化石燃料将逐渐被光伏电池、海浪发电和风力发电机等可再生资源所替代, 且需求量很大。目前, 来自分散源的直流电源通常被转换为交流电源来连接商业配电系统。然而, 事实上, 许多负载设备需要直流电, 所以转换完的交流电需再次转换为直流电, 为这些设备供电。因此, 由于这些功率转换, 大量的功率损耗是不可避免的^[1-3]。为

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)

了降低电能损耗, 提高电能质量, 直流输电技术现如今越来越受到人们的重视。直流输电相较于传统的交流输电来说具有线路损耗小, 电能质量好等优点, 而且在远距离大功率输电方面得到了广泛应用^[4-7]。随着直流负荷比例的增加和可再生发电机组接入电网, 直流配电技术以其高灵活性, 功率可控性展现出更加突出的优势^[8-12]。

为了实现更智能的直流输电系统, 文献[13]引入一种新型家庭直流电力分配系统, 即电力分组调度系统。电力分组调度系统是基于信息和电信网络中的分组传输进行电力分配^[14-15], 从而更有效地提高最终使用能耗的效率。文献[16]通过使用一条电力线成功实现从两个电源到两个负载的分组传输, 证明提出的室内直流电力分组调度系统是可行的。文献[14]提出了两种系统, 基于交流配电的电路开关系统和通过电力包的直流电力调度系统, 使家庭配电系统更有效率, 更容易控制能源流动。文献[17]构建了应用调节算法的开关控制器, 用于电力分组调度, 能够进行功率调节, 满足系统中多负载的同时电力需求。文献[18]提出一种基于多源单电感降压变换器的多源混频器, 能够通过共享来自多个电源产生的电力, 产生不同电压等级的电力包。

电力分组调度系统中混频器将直流电源产生的电力转换为电力包, 并通过单个配电线将其传输给路由器, 路由器接收电力包后根据电力包所携带的信息分发给负载。文献[13,19]对系统中的混频器和路由器的组成、工作过程和功能进行了详细的介绍。通常, 电力包包括电力和附加在电力上的信息标签, 其中信息标签包含包头和包尾。文献[20]提出了一种减少包尾位的电力包结构, 增加了有效负载的长度, 并且能够有效减少开关损耗。但是, 该文献只对包尾进行了分析, 减少了包尾位, 没有考虑信息标签中的包头是否也可以减少数据位。此外, 电力供需平衡是电网系统中的一个核心问题, 而电力调度是实现电力供需平衡的主要手段^[21], 文献[22-23]中提到电力调度过程, 多源产生电力, 混频器将其分别发送给路由, 路由再依次转发给负载, 这里没有考虑到负载对电力的需求是不同的, 随机按顺序配电可能会出现电力不平衡的问题。

针对上述问题, 本文对电力包进行了改进, 将多个电力包合为一个超级电力包, 显著地减少了信息位, 通过计算比较得出, 以该结构进行输配电时减少了传输的时间, 提高了效率。然后, 在合成电力包时, 根据负载对电力的不同需求, 本文设计了一套基于启发式算法的电力分配方案, 保证电力平衡。最后, 对超级电力包的时间关系式和电力分配

算法进行仿真分析, 仿真结果验证了超级电力包的可行性以及优势。

1 电力分组调度系统模型

1.1 系统组成

电力包传输系统由多个源、多个负载、混合器、路由器以及连接混合器和路由器的单个配电线组成。该系统是以时分复用(Time Division Multiplex, TDM)的形式进行功率分配的, 实现了在单个配电线上能够传输多个电力包。电力包调度的过程如图1所示, 混合器收集 N 个直流电源产生的电力, 将其转换为 N 个电力包, 按顺序将电力以包为单位在单个配电线上依次传输, 路由器接收电力包后读取电力包的包头和包尾, 根据包头中包含的地址信息对电力包进行排序并将其依次发送给目标负载。负载所需要的电量大小可以通过控制电力包的数量来进行提供。

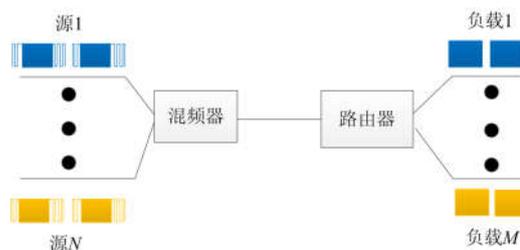


图1 电力包调度的过程

Fig. 1 Power packet scheduling process

1.2 电力包结构

电力包由包头、功率负荷和包尾组成。包头具有6个数据位, 包括开始信号和地址信号, 前三位数据位是开始信号, 标记电力包开始; 后三位数据位是地址信号, 对应于电力包所到达的目的负载的地址信息。包尾具有6个数据位, 包含结束信号, 标记电力包结束, 另外其他信息也可以包含在包尾中。功率负荷携带所选电源提供的功率。在传输过程中, 电力和信息以相同速度同时传输。一般包头和包尾由固定字节脉冲构成, 它们作为标签物理连接到功率负荷, 仅用于通信。电力包的结构如图2所示。

2 超级电力包的设计

为了节省总传输时间, 提高效率, 本文对电力包的结构进行了改进, 提出了一种超级电力包的概念, 超级电力包是由 n 个电力包合成1个电力包。为了方便叙述, 在接下来的讨论中, n 取最小的2, 对于验证超级电力包传输的可行性并不会失去通用性。

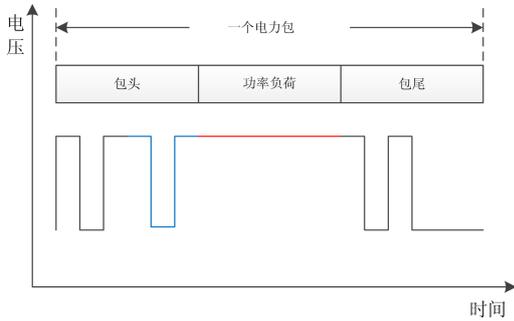


图 2 电力包的结构

Fig. 2 Power packet structure

2.1 超级电力包的结构

n 为 2 的超级电力包的结构如图 3 所示，由包头、功率负荷和包尾组成。包头具有 9 个数据位，包括开始信号、目的负载 1 的地址信号和目的负载 2 的地址信号，前三位数据位是开始信号，开始信号在每个电力包中都共有且相同，所以在这里超级电力包中的两个电力包可共用一个，用来标记超级电力包开始，后六位数据位是地址信号，在地址信号中，前三位是目的负载 1 的地址信号，后三位是目的负载 2 的地址信号。功率负荷携带源 1 和源 2 所提供电力的总和，电力的匹配问题在第三节有详细的描述。包尾具有 6 个数据位，包含结束信号，结束信号在每个电力包中也都有且相同，因此超级电力包里的两个电力包也能够共用一个结束信号，用来标记超级电力包结束。包头和包尾的位分配如表 1 所示。

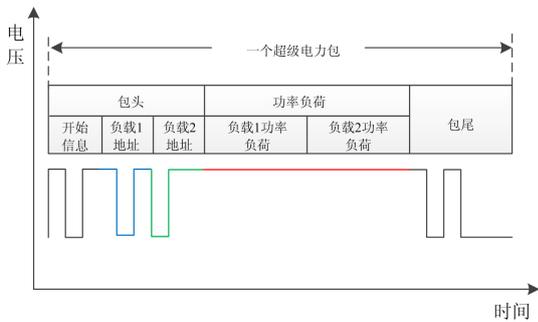


图 3 n 为 2 的超级电力包的结构

Fig. 3 Structure of the super power packet with n being 2

表 1 包头和包尾的位分配

Table 1 Bit assignment of header and footer

包头		
开始信号	负载 1 地址	负载 2 地址
101	101	011
包尾 (“*” 表示 “不必在乎”)		
结束信号		
10100*		

2.2 可调节的超级电力包

混合器收集 N 个直流电源产生的电力，两个为一组转换为一个超级电力包，超级电力包以时分复用的方式在单个配电线上传输，一个时隙传输一个超级电力包，路由器接收超级电力包后，首先按顺序识别包头中的第一个目的负载的地址，接着储存第二个目的负载的地址，然后给第一个目的负载配送它所需要的电力，之后再给第二个目的负载配送它所需要的电力。

路由器在给两个负载分配电力时会由两个负载需求的电力是否相同出现两种情况。当两负载需求的电力相同时，直接以图 3 的结构进行传输，路由器将把功率负荷均分给两负载。当两负载需求的电力不相同，本文提出一种可调节的超级电力包，结构如图 4 所示。

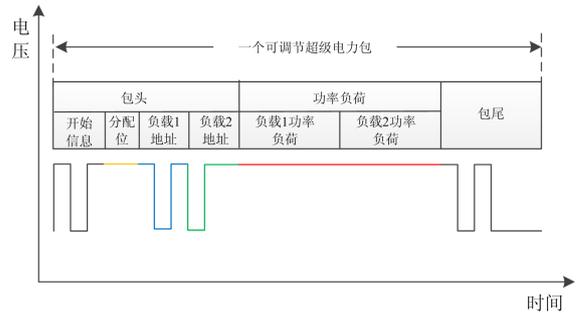


图 4 可调节的超级电力包的结构

Fig. 4 Structure of adjustable super power packet

设 l 表示功率负荷的总长度， h 表示将功率负荷均分后的单位长度，可以得到 $l = nh$ ， n 为一个正整数，可调节的超级电力包与超级电力包相比，结构中多了 2 个数据位的分配信息，用二进制表示，位于包头中开始信号与地址信号中间，用来标记负载 1 所需功率负荷的份数，这里最多能表示 4 份。包头的位分配如表 2 所示，路由器识别该信息后，将 3 份功率负荷配送给负载 1，剩余的功率负荷则全部配送给负载 2，这样就达到了功率分配可调节的效果。

表 2 包头的位分配

Table 2 Bit assignment of header

开始信号	分配信息	负载 1 地址	负载 2 地址
101	11	101	011

2.3 超级电力包的优势

假设电力包包头时间长度为 l_h ，包尾时间长度为 l_f ，功率负荷时间长度为 l_p ，包头和包尾中的每个数据位的时间长度是相等的。以电力包为单位分

配电力时, 一个时隙传输一个电力包, 两源两负载模型中需要传输两个电力包分配给负载, 所需的时间总长度为 $L_1 = (l_h + l_f + l_p) \times 2$ 。以超级电力包为单位分配电力时, 一个时隙传输一个超级电力包, 两源两负载模型中需要传输一个超级电力包分配给负载, 所需的时间总长度为

$$L_2 = l_h \times \frac{3}{2} + l_f + l_p \times 2$$

若是可调节的超级电力包, 所需的时间总长度为

$$L_3 = l_h \times \frac{11}{6} + l_f + l_p \times 2$$

假设一个电力包总时间长度为 $250 \mu\text{s}$, 包头时间长度 $l_h = 15 \mu\text{s}$, 包尾时间长度 $l_f = 15 \mu\text{s}$, 功率负荷时间长度 $l_p = 220 \mu\text{s}$ 。代入上面的公式可以得出, $L_1 = 500 \mu\text{s}$, $L_2 = 477.5 \mu\text{s}$, $L_3 = 482.5 \mu\text{s}$ 。由此可见, $L_2 < L_3 < L_1$, 所以以超级电力包为单位进行电力分配所用时间长度较短, 提高了效率。

3 基于启发式算法的电力匹配

3.1 优先规则

启发式算法的基本特点之一就是应用一定的优先规则来对分配任务进行处理^[24-26], 通过推迟一些负载的需求或者调整电力的分配情况等手段来达到最终满足负载 QoS 的要求。不同的负载对电力的需求不尽相同, 为了对不同负载进行具有区分的 QoS 服务, 需要按优先级给这些多样要求的负载分配电力, 也就是在合成超级电力包时, 需要将源提供给负载的电力按优先级两两进行匹配, 合成最优的超级电力包。于是, 为了保证负载的需求得到最优的满足, 首先要选择合理的优先规则。本文主要以负载需求电力的急迫性以及所需要电量的多少这两种指标作为电力匹配时所要考虑的优先级内容。

1) 不同的负载具有不同的功能, 需要完成不同的任务, 所以它们需求电力的急迫性是不同的, 因此在匹配电力时, 要将负载需求电力的急迫程度进行排序, 先匹配急迫程度高的合成超级电力包, 由此先满足急迫程度高的负载用电。

2) 本模型中, 源电压确定, 目的负载确定, 由 $t = \frac{R}{U^2} P$ 可得, 负载的用电量决定功率负荷的时间长度, 不同的负载需要的用电量是不同的, 因此所转换的功率负荷的时间长度是不同的。为了提高系统传输效率, 本文设定超级电力包的电量 p 是一个定值, 即功率负荷的时间长度 l 是一个定值, 因此

源电压产生电力后再进行两两匹配转换为超级电力包时, 需要提供给两个负载的电量之和不能超过定值 p , 即合成的超级电力包的功率负荷的时间长度不能超过定值 l , 优先规则是无限接近定值甚至等于定值, 由此可以在有限的时间里提供给负载最多的电量。

3.2 算法步骤

综合上述优先规则, 超级电力包在合成时电力分配算法步骤如下。

步骤一: 将负载需求电力的急迫程度按从大到小的顺序进行排序, 选出需求电力急迫程度最高的负载, 将该负载提供电力的电源产生的电力作为合成超级电力包的第一部分;

步骤二: 用超级电力包中功率负荷的时间长度 l 减去步骤一中选取的第一部分的电力对应的时间长度 d , 得出超级电力包中剩余的功率负荷的时间长度 c ;

步骤三: 在剩余的负载中选出所需电量对应的时间长度不大于时间长度 c 的;

步骤四: 在步骤三选出的负载们中再选出所需电量对应的时间长度无限接近甚至等于时间长度 c 的负载, 将该负载提供电力的电源产生的电力作为合成超级电力包的第二部分, 结束算法; 若有多个这样的负载, 则转入步骤五;

步骤五: 若有多个这样的负载, 那么就再以急迫性作为优先规则, 在这之中选择急迫程度最高的一个, 将该负载提供电力的电源产生的电力作为合成超级电力包的第二部分, 结束算法。

算法流程图如图 5 所示。

4 仿真分析

4.1 用户数和输配电时间的关系

通过第二节对电力包结构的改进, 本文设计的超级电力包节省了输配电的时间。第二节第三部分分析了超级电力包的优势, 得出在给两个负载提供电力时, 以超级电力包为单位输配电的时间公式和以电力包为单位输配电的时间公式, 本小节将对该时间公式进行仿真分析。假设一个电力包总时间长度为 $250 \mu\text{s}$, 包头时间长度 $l_h = 15 \mu\text{s}$, 包尾时间长度 $l_f = 15 \mu\text{s}$, 功率负荷时间长度 $l_p = 220 \mu\text{s}$ 。图 6 为用户数与输配电时间之间的仿真表示, 从图中可以看出, 用户数一样时, 通过超级电力包传输电力所用的时间要比通过电力包传输电力所用的时间短。此外, 随着用户数的增多, 两者时间的差值越来越大。因此, 可以得出, 通过超级电力包输配电

时,节省了传输的时间,减少了负载的等待时间,更有效率地为负载提供了电力。

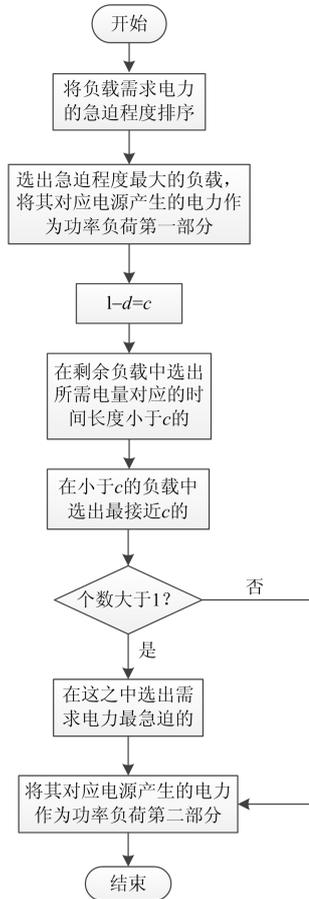


图5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flowchart

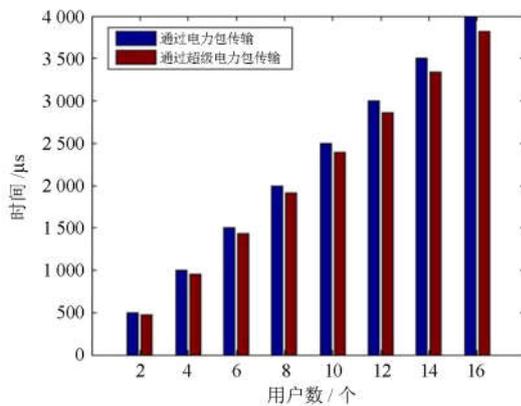


图6 用户数和输电时间的关系

Fig. 6 Relationship between number of users and transmission and distribution time

4.2 超级电力包数量和用户数的关系

负载对电力的需求各不相同,本文设计了启发

式算法下的超级电力包,将源提供给负载的电力按优先规则两两进行匹配,合成最优的超级电力包。本小节将对该算法进行仿真分析,对比按源顺序合成的超级电力包、按负载急迫性顺序合成的超级电力包和按启发式算法合成的超级电力包三者对负载的供电能力。设需要给12个用户供电,这12个用户需求电力的急迫程度从高到低依次为用户4>用户2>用户3>用户9>用户12>用户1>用户5>用户6>用户10>用户7>用户11>用户8,这12个用户所需的电力对应的时间长度依次为 $l_1 = 255 \mu s$ 、 $l_2 = 200 \mu s$ 、 $l_3 = 185 \mu s$ 、 $l_4 = 240 \mu s$ 、 $l_5 = 205 \mu s$ 、 $l_6 = 245 \mu s$ 、 $l_7 = 235 \mu s$ 、 $l_8 = 220 \mu s$ 、 $l_9 = 260 \mu s$ 、 $l_{10} = 195 \mu s$ 、 $l_{11} = 220 \mu s$ 、 $l_{12} = 180 \mu s$ 。图7为超级电力包数量和用户数之间的仿真分析,从图中可以看出,6个按启发式算法合成的超级电力包成功给这12个用户完成配电,而6个按负载急迫性顺序合成的超级电力包只给9个用户提供了电力,6个按源顺序合成的超级电力包只给7个用户提供了电力。另外,传输的超级电力包数量相同时,按照本文第三节设计的算法合成的超级电力包能够给更多的用户提供电力。图8为超级电力包数量和提供给负载的电力对应的时间长度之间的仿真分析,从图中可以看出,按启发式算法合成的超级电力包能够提供最多的电力。另外,将两图结合并且具体到数据来看,当传输2个超级电力包时,按启发式算法合成的超级电力包能够给4个用户提供电力,提供的总电力对应的时间长度为 $880 \mu s$;按源顺序合成的超级电力包能够给3个负载提供电力,提供的总电力对应的时间长度为 $640 \mu s$;按负载急迫性顺序

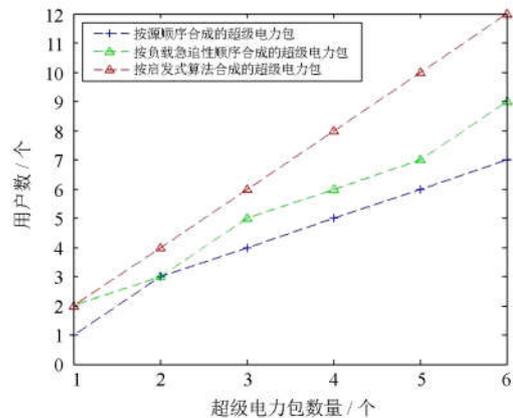


图7 超级电力包数量和用户数的关系

Fig. 7 Relationship between the number of super power packets and the number of users

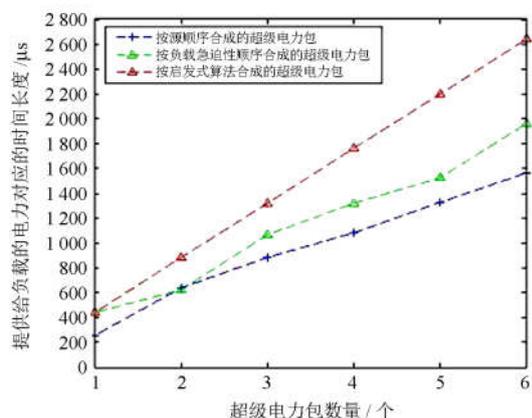


图8 超级电力包数量和提供给负载的电力对应的时间长度的关系

Fig. 8 Relationship between the number of super power packets and the length of time corresponding to the power supplied to the load

合成的超级电力包能够给3个负载提供电力, 提供的总电力对应的时间长度为625 μs。因此, 可以得出, 在合成超级电力包时要兼顾考虑负载需求电力紧迫程度和负载需求电力的多少两个因素, 这样能够满足更多用户的用电需求, 降低了用户出现用电空窗时间的机率, 并且, 随着超级电力包个数的增加, 这个优势更加明显。另外, 即使超级电力包提供电力的用户数相同, 但由于合成方案不同, 即选中的用户也不同, 所以提供的总电力对应的时间长度不一定相同。

5 结论

为了减少负载用电等待时间, 本文对电力包的结构进行了改进。首先, 提出一种超级电力包的概念, 将多个电力包合成一个超级电力包, 超级电力包相较于电力包节省了总字节数, 以超级电力包为单位进行输配电减少了传输时间。继而, 为了满足不同负载对电力不同的需求量, 又提出一种可调节超级电力包的概念, 在包头中加了分配数据位, 能够按照负载的需求量转发相应的电力。另外, 在合成超级电力包时, 为了满足不同负载的需求, 提高负载的用电质量, 本文设计了一套电力分配启发式算法, 这套算法中提出了两个优先规则, 负载用电紧迫性和负载用电的多少, 负载对应的源产生的电力根据这两个优先规则合成最优的超级电力包。通过仿真, 验证了超级电力包的可行性和优势, 并且负载数量越多, 优势就更加明显。该方法为之后在节省传输时间方面的研究和扩展提供了一定的依据。

参考文献

- [1] TAKAHASHI R, AZUMA S I, TASHIRO K, et al. Design and experimental verification of power packet generation system for power packet dispatching system[C] // American Control Conference, June 17-19, 2013, Washington, DC, USA: 4368-4373.
- [2] 张祖平. 直流配电技术的发展前景[J]. 供用电, 2014, 31(7): 16-19.
ZHANG Zuping. Development prospects of DC power distribution technology[J]. Distribution & Utilization, 2014, 31(7): 16-19.
- [3] 李保罡, 晏彬洋, 董若楠, 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.
- [4] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [5] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [6] 李超, 王维庆, 樊小朝, 等. 直流配电网的发展及优势分析[J]. 应用能源技术, 2016(3): 34-38.
LI Chao, WANG Weiqing, FAN Xiaochao, et al. Research on the development and advantage of DC power distribution grid[J]. Applied Energy Technology, 2016(3): 34-38.
- [7] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [8] 康青, 马晓春, 叶卫华, 等. 直流配电网关键技术及展望[J]. 电气自动化, 2014, 36(1): 5-7, 23.
KANG Qing, MA Xiaochun, YE Weihua, et al. Key technology of DC distribution network and its prospect[J]. Electrical Automation, 2014, 36(1): 5-7, 23.
- [9] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. 直流配电技术综述[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 556-564.

- CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. A review of DC power distribution technology[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(3): 556-564.
- [10] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(24): 40-46.
- DENG Shilei, WANG Mingyu. Cooperative control strategy of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 40-46.
- [11] 刘会家, 管鑫, 陈波, 等. 考虑主动需求的主动配电网负荷预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(10): 68-74.
- LIU Huijia, GUAN Xin, CHEN Bo, et al. Active distribution network load forecasting considering active demand[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(10): 68-74.
- [12] XU Y, LIU J, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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, November 5-8, 2012, Tainan, Taiwan, China: 401-405.
- [17] TAKAHASHI R, AZUMA S, 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 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] TAKAHASHI R, TAKUNO T, HIKIHARA T. Estimation of power packet transfer properties on indoor power line channel[J]. *Energies*, 2012, 5(7): 2141-2149.
- [20] REZA C M F S, LU D D. Improved power routing algorithm for power packet distribution system[C] // 2016 IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics, October 11-14, 2016, Kyoto, Japan: 1-2.
- [21] 常海松, 刘家豪, 刘天晓. 基于优先级的可控负载调度算法[J]. *通信电源技术*, 2017, 34(1): 64-65.
- CHANG Haisong, LIU Jiahao, LIU Tianxiao. Controllable load scheduling algorithm based on priority[J]. *Telecom Power Technologies*, 2017, 34(1): 64-65.
- [22] 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.
- [23] KATAYAMA S, HIKIHARA T. Energy-on-demand control for power packet dispatching via single power line[C] // 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), October 7-11, 2018, Turin, Italy: 1-5.
- [24] 章文俊, 程浩忠, 程正敏, 等. 配电网优化规划研究综述[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2008, 20(5): 16-23, 55.
- ZHANG Wenjun, CHENG Haozhong, CHENG Zhengmin, et al. Review of distribution network optimal planning[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2008, 20(5): 16-23, 55.
- [25] 廖仁, 陈庆新, 毛宁. 资源约束下多项目调度的启发式算法[J]. *管理工程学报*, 2002, 16(增刊 1): 100-103.
- LIAO Ren, CHEN Qingxin, MAO Ning. A heuristic algorithm for resource-constrained project scheduling[J]. *Journal of Industrial Engineering Management*, 2002, 16(S1): 100-103.
- [26] 何正文, 贾涛, 徐渝. 求解资源约束项目调度问题的启发式算法综述[J]. *运筹与管理*, 2007, 16(3): 78-84.
- HE Zhengwen, JIA Tao, XU Yu. A survey of heuristics for resource-constrained project scheduling problems[J]. *Operations Research and Management Science*, 2007, 16(3): 78-84.

收稿日期: 2019-07-17; 修回日期: 2019-11-18

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

郭文利(1977—), 男, 主要从事电气工程自动化、多能源微网、直流供电方面的工作。

(编辑 周金梅)