

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190402

基于直流电力分组传输的缓存储能研究

高冰¹, 杜娟¹, 安世华¹, 赵志辰¹, 魏明磊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: 直流配电网中基于电力分组传输的调度系统实现了电能的有效分配, 然而, 由于分组供能的断续性, 缓存储能问题变得至关重要。着重对直流电力分组传输系统中的储能缓存器容量进行了分析。利用一阶电路三要素法推导出电容容量表达式, 将其应用到电力分组系统中, 得出缓存器容量范围, 建立了缓存器和负载之间的关系。基于其关系, 从时分复用的角度分析了系统可容纳负载数量问题。最后, 使用 Matlab 软件对其数学关系进行理论仿真分析。结果表明, 可以通过减小电力包的有效载荷持续时间等来满足更多负载的需求。这一研究在一定程度上既减少了投资成本, 又使电力资源得到了有效利用。

关键词: 直流电力分组传输; 缓存器; 电容; 时分复用; 负载

Research on energy storage buffer based on DC power packet transmission

GAO Bing¹, DU Juan¹, AN Shihua¹, ZHAO Zhichen¹, WEI Minglei¹, WANG Mengyuan², LI Baogang²

(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 dispatching system based on power packet transmission in the DC distribution network realizes the efficient allocation of electric energy. However, due to the intermittent nature of packet energy supply, the problem of energy storage buffer becomes critical. This paper focuses on the analysis of the energy storage buffer capacity in the DC power packet transmission system. The first-order circuit three-element method is used to derive the capacitance capacity expression, which is applied to the power packet system to obtain the buffer capacity range, and the relationship between the buffer and the load is established. Based on its relationship, the problem of the number of loads that the system can accommodate is analyzed from the perspective of time division multiplexing. Finally, Matlab software is used to theoretically analyze the mathematical relationship. The results show that the demand for more loads can be met by reducing the payload duration of the power packet and the like. To a certain extent, this research has reduced investment costs and enabled the effective use of power resources.

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

Key words: DC power packet transmission; buffer; capacitance; time division multiplexing; load

0 引言

近年来, 煤炭、石油、天然气等不可再生化石能源已无法持续满足人类的能源需求, 因此, 太阳能、风能、潮汐能等可再生能源的需求量日益增大。为充分发挥可再生能源在供电系统的效能, 直流输电技术现如今已受到广泛关注, 直流输电相对

于传统的交流输配电来说, 不仅线路损耗更低, 而且适合远距离的大功率输电^[1-4]。由于电网中各种直流负荷比重越来越大, 交流配电网面临着电压波动等问题, 而直流配电网具有线路损耗小、电能质量高、供电容量大等优点, 可以适应各种负荷的变化^[5-8]。在直流输配电系统逐步成熟的背景下, 为了更有效地进行能源分配和实现精准供电, 提出一种新型家庭直流电力分配系统, 即电力分组调度系统^[9-11]。电力分组调度系统可以灵活调节所传输电力, 是实现直流配电的一种新兴方式^[12-14]。

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)

文献[15]在局域分组电网环境下, 提出一种协议, 即将用户匹配成需求供应对, 并将匹配对传输任务按序安排到路由器的多个电力通道上, 实现了更高效的电力调度。文献[16]中通过两个源、两个负载的实验证明提出的室内直流电力分组调度系统是可行的。电力分组调度系统可以实现每个负载根据其电能质量从选定的电源得到所需的电力。在传统的通信网络中, 数据包传输的是信息, 而电力包主要是根据包上所携带的信息传输电力。电力分组系统包括多个混频器和多个路由器, 混频器用于产生电力包, 并通过电力线将其传输给路由器, 路由器接收到电力包后, 会将其转发给负载。文献[9]和文献[17]对混频器和路由器的组成、功能进行了详细的介绍。文献[18]提出了单电感多源混频器, 可以产生不同额定电压的电力包, 实现了从多个电源或能源分享电力, 从而更有效地利用了可再生能源。上述文献中, 路由器是直接将电力包转发给负载, 而文献[19]中提出一种新的级联网络化电力分组分配系统, 可以通过多个路由器转发电力包到目的负载, 并且新提出的路由器在转发电力包给其他路由器的过程中, 会将信息标签重新添加到有效载荷上, 不会丢失信息, 保证了其准确性。

由于电网有限的接纳能力, 可再生能源并不能被充分利用, 进而发展出了分布式电源直流配电技术, 同时储能技术也引发了大家的关注^[20-22]。在电力系统中, 储能技术可以起到削峰填谷、平抑可再生能源输出波动、提高新能源接纳能力以及改善电能质量的作用, 并且在多个场合中得以应用^[23-26]。在电力分组调度系统中, 由于分组传输的断续性, 会造成电力供应的间断, 而缓存储能的应用可以有效解决该问题。文献[27]在负载侧加入了储能缓存器, 实现了电源和负载之间的连续电力传输, 并讨论了缓存器的容量规划。但是, 该文献未能对缓存器容量进行优化, 未考虑在节省成本的条件下, 一根电力线可以同时为多少用户供电的问题。

针对上述问题, 本文着重对直流电力分组传输中缓存器的容量规划进行研究。利用三要素法推导出了电容值与电阻之间的关系表达式, 并结合到电力分组系统中, 从时分复用技术的角度, 分析了负载个数与负载阻值、有效载荷持续时间等的数学关系式。同时, 根据其关系式进行了仿真分析, 实验结果证实了该方法的可行性, 该方法可以进一步应用到传输线数量的问题分析上。

1 电力分组传输系统模型

1.1 系统组成

电力分组传输系统模型如图 1 所示。该系统包括一个直流电源、多个负载、多个缓冲器、混频器和路由器, 混频器和路由器之间由单根电力线连接。直流电源产生的电力通过混频器转换成电力包的形式, 并在电力线上进行传输。在此传输过程中, 采用时分复用技术, 以便于电源产生的多个电力包依次传输。其中, 每个负载对应一个固定的时隙, 且此时隙周期性地出现。之后, 路由器读取电力包的标签信息, 根据其标签信息将电力包转发给目的负载。此外, 可通过控制电力包的数量来为负载提供其所需电力。当传输电力给某一负载时, 为了不使其他负载上的电力供应中断, 故于负载前加入电容缓存器^[28]。

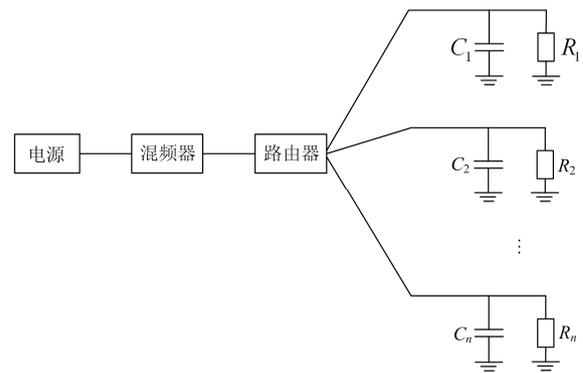


图 1 电力分组传输系统模型

Fig. 1 Power packet transmission system model

1.2 电力包结构

电力包是信息与电力的结合, 并以矩形波的形式呈现。电力包结构如图 2 所示, 一个电力包由头部、有效载荷、尾部三部分构成。其中, 头部和尾部均为信息标签, 头部包括起始信息、源地址和目的地址信息, 尾部为电力包传输结束信号。有效载荷携带要传输的电力。电力和信息标签以包的形式在同一物理层以相同的速率进行传输。另外, 有效载荷所携带的电力量可以通过改变有效载荷的长度来调节, 即控制有效载荷的持续时间。

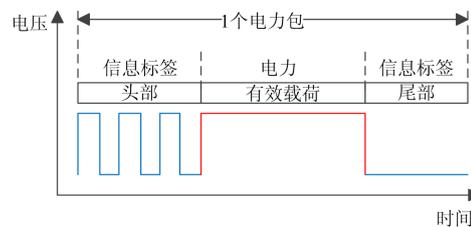


图 2 电力包结构

Fig. 2 Power packet structure

2 缓存器容量分析

为便于电容值的分析,图1可以等效为简单的一阶电路图,如图3所示。图中电阻 R 表示传输线上的电阻,电容 C 表示缓冲器,电阻 R_L 表示负载电阻。实际用电器中既有容性负载,又有感性负载,在此,本文将考虑理想电阻以降低分析复杂性,并且考虑到电容特性,分析电路时将涉及微分方程。对于此电路图,本文采用三要素法进行分析。一阶电路三要素包括初始值 $f(0_+)$ 、稳态值 $f(\infty)$ 和时间常数 τ ,三要素法通式为

$$f(t) = f(\infty) + [f(0_+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

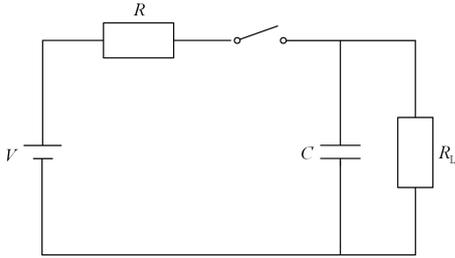


图3 电力包调度系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of power packet dispatching system

2.1 电容充电

根据电力分组调度系统的原理,在电力包未到达路由器之前,电路中的开关处于断开状态,此时可以得到电容电压的初始值。当电力包到达路由器时,路由器会根据包上的标签信息选择开关,开关闭合之后,电路处于稳定状态,可得到当前稳态值。时间常数 $\tau = R_0 C$,其中 R_0 表示换路后从电容 C 看进去的戴维南等效电阻。

充电时刻的三要素如下。

初始值

$$U_c(0_+) = U_c(0_-) = 0 \quad (2)$$

稳态值

$$U_c(\infty) = \frac{R_L}{R + R_L} V \quad (3)$$

时间常数

$$\tau = \frac{R \cdot R_L}{R + R_L} C \quad (4)$$

式中: U_c 为电容电压; V 为源电压; C 为电容值。将上述各参数代入式(1)中,化简得

$$U_{C1} = \frac{R_L}{R + R_L} V \left[1 - e^{-\frac{t_1(R + R_L)}{R \cdot R_L \cdot C}} \right] \quad (5)$$

式中, t_1 为电容充电时间。

2.2 电容放电

电容放电时的分析方法与充电时类似,路由器转发电力包过程中,开关处于闭合状态。当读取到电力包的尾部信息时,表示该电力包传输结束,开关断开。

放电时刻的三要素如下。

初始值

$$U_c(0_+) = U_c(0_-) = \frac{R_L}{R + R_L} V \quad (6)$$

稳态值

$$U_c(\infty) = 0 \quad (7)$$

时间常数

$$\tau = R_L C \quad (8)$$

代入式(1)中,得

$$U_{C2} = \frac{R_L}{R + R_L} V \cdot e^{-\frac{t_2}{R_L C}} \quad (9)$$

式中: U_{C2} 为此时的电容电压; t_2 为电容放电时间。

为便于简化分析,可将式(5)和式(9)分别化简为

$$U_{C1} = V \left(1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} \right) \quad (10)$$

$$U_{C2} = V \cdot e^{-\frac{t_2}{R_L C}} \quad (11)$$

2.3 电容范围的确定

从电容充电角度分析,令 $r = V_c / V$,其中, r 表示可容许电压降, V_c 表示此时的电容电压, V 表示电压峰值^[27]。 t_{on} 代替 t_1 , t_{on} 为电容充电时间。代入式(10),并经简单变换,得到

$$C = -\frac{t_{on}}{R \ln(1-r)} \quad (12)$$

对于电容来说,时间常数越小,充放电速度越快。一般情况下 $R < R_L$,所以电容放电时间比充电时间长,即 $t_{on} \leq t_{off}$ (t_{off} 为电容放电时间)。则式(12)可推导为

$$C \geq -\frac{t_{off}}{R \ln(1-r)} \quad (13)$$

因为 $R < R_L$,则缓冲器的电容容量可表示为

$$C \geq -\frac{t_{off}}{R_L \ln(1-r)} \quad (14)$$

此结果与文献[27]中的缓冲器电容范围是一致的。

2.4 实现 n 个用户传输

为减少投资成本,与负载并联的电容容值不能

过大。同时也要考虑到满足 n 个负载在同一根电力线上的传输, 容值不能太小, 防止给 n 个负载传输电力的过程中会有用户发生电力中断。因此, 为实现 n 个负载传输, 利用时分复用的思想, 如图 4 所示, 一个周期的时间 T 要满足:

$$\sum_{i=1}^n t_{on_i} + n(t_{头} + t_{尾}) = T \quad (15)$$

式中, t_{on_i} 表示传输给第 i 个负载的电力包的有效载荷持续时间。

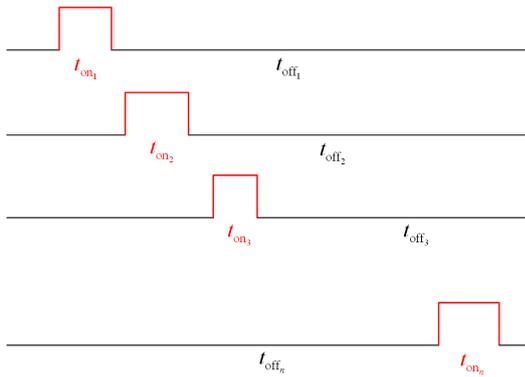


图 4 一个周期内持续时间表示

Fig. 4 Duration representation in one cycle

为了不使传输过程中电力包发生重合, 第 $i+1$ 个负载到第 n 个负载的有效载荷持续时间和必须小于第 i 个负载的等待时间, 即要满足:

$$\begin{cases} t_{on_2} + t_{on_3} + \dots + t_{on_n} < t_{off_1} \\ t_{on_1} + t_{on_3} + \dots + t_{on_n} < t_{off_2} \\ \vdots \\ t_{on_1} + t_{on_2} + \dots + t_{on_n} < t_{off_{n-1}} \\ t_{on_1} + t_{on_2} + \dots + t_{on_{n-1}} < t_{off_n} \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)中各式彼此进行相加, 得

$$(n-1)(t_{on_1} + t_{on_2} + \dots + t_{on_n}) < t_{off_1} + t_{off_2} + \dots + t_{off_n} \quad (17)$$

假设有一固定电容值, 为了使该电容值满足 n 个负载使用, 也就是说在与 n 个用户并联的电容容值相同的情况下, 负载可以正常工作。则每个负载的等待时间必须满足:

$$\begin{cases} t_{off_1} \leq -R_1 C \ln(1-r) \\ t_{off_2} \leq -R_2 C \ln(1-r) \\ \vdots \\ t_{off_n} \leq -R_n C \ln(1-r) \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)中各式依次相加, 得

$$\begin{aligned} t_{off_1} + t_{off_2} + \dots + t_{off_n} &\leq \\ -(R_1 + R_2 + \dots + R_n) C \ln(1-r) &\end{aligned} \quad (19)$$

综合式(17)和式(19), 得

$$(n-1)(t_{on_1} + t_{on_2} + \dots + t_{on_n}) < -(R_1 + R_2 + \dots + R_n) C \ln(1-r) \quad (20)$$

对上式进一步变换, 得

$$n < -\frac{\sum_{j=1}^n R_j}{\sum_{i=1}^n t_{on_i}} C \ln(1-r) + 1 \quad (21)$$

所以 n 值即为式(21)的最大整数解。

3 仿真分析

通过上一节的分析和推导, 由式(21)可以确定电容、负载阻值和电力包有效载荷持续时间之间的数学关系, 本节将利用 Matlab 仿真软件对此数学关系进行进一步的说明及验证。

3.1 负载阻值与负载个数之间的关系

假设每个负载的阻值都相同, 即 $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, 且阻值范围为 $100 \sim 500 \Omega$, 每个电容的可容许电压降 $r = 0.05$ 。令有效载荷持续时间 $t_{on_1} = t_{on_2} = \dots = t_{on_n} = t_{on}$, 并给定三个值: $500 \mu\text{s}$ 、 1ms 、 5ms 。根据式(14)以及负载阻值相同, 令电容 $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C = 470 \mu\text{F}$ 。图 5 是对这两者关系的仿真分析。从图 5 中可以看出, 有效载荷持续时间相同时, n 随着阻值 R 的增加而上升, 也就是说每个负载配备一个相同电容时, 负载阻值越大, 系统可以容纳更多的负载。另外, 负载阻值相同时, t_{on} 值越大, 可容纳的负载数越少。

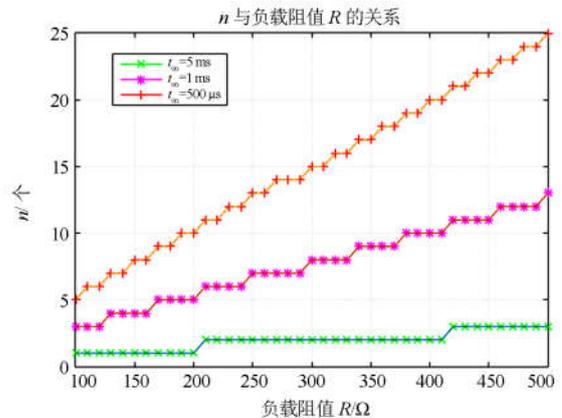


图 5 负载阻值与负载个数之间的关系

Fig. 5 Relationship between load resistance and number of loads

3.2 有效载荷持续时间与负载个数之间的关系

设负载阻值相同, 即 $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, 给定三个值: 50Ω 、 100Ω 、 300Ω 。有效载荷时间

长度 $t_{on_1} = t_{on_2} = \dots = t_{on_n} = t_{on}$ ，其变化范围是 $250 \mu s \sim 1 \text{ ms}$ 。其他值的设定同 3.1 节一样，保持不变。图 6 为有效载荷持续时间与负载个数之间的仿真表示。从图 6 中可以看出，负载阻值一定时，有效载荷持续时间增加，负载个数减少。此外，当有效载荷持续时间相同时，随着负载阻值的增大，负载个数呈现增加趋势。因此，在以时分复用的方式传输电力包时，为了满足更多负载的需求，有效载荷持续时间应设置小一些。

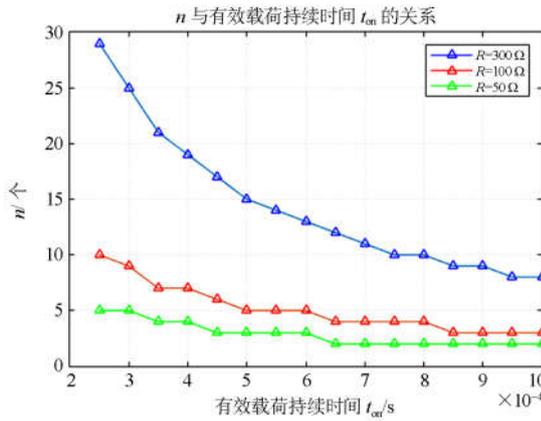


图 6 有效载荷持续时间与负载个数之间的关系

Fig. 6 Relationship between payload duration and number of loads

同时，通过式(15)可以确定传输电力包的最佳周期。从图 6 中可以观察到，在负载阻值为 100Ω 的情况下，令 $t_{头} = t_{尾} = 30 \mu s$ ， t_{on} 取 $300 \mu s$ 、 $500 \mu s$ 、 $700 \mu s$ 所对应的最佳周期分别为 3.24 ms 、 2.8 ms 、 3.04 ms 。结果表明，负载阻值一定时，最佳周期同时受有效载荷持续时间和负载个数两个条件的制约。

3.3 可容许电压降与负载个数之间的关系

为简化分析，设负载阻值 $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ ，给定三个值： 50Ω 、 100Ω 、 300Ω 。有效载荷持续时间长度 $t_{on} = 500 \mu s$ ，电容值保持不变，即 $C = 470 \mu F$ 。可容许电压降的变化范围为 $r = 2\% \sim 5\%$ 。图 7 为可容许电压降和负载个数之间的仿真结果。从图 7 中可以看出，随着可容许电压降的增加，负载个数也会增多。因此，可以通过提升可容许电压降，来保证更多负载正常运行。

3.4 电容与负载个数之间的关系

令 $r = 0.05$ ， $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ ， t_{on} 取三个值： $250 \mu s$ 、 $300 \mu s$ 、 $500 \mu s$ 。 C 取三个值： $330 \mu F$ 、 $470 \mu F$ 、 $1000 \mu F$ 。图 8 分析了不同电容值与负载个数之间的关系。从图 8 中可以看出，负载阻值一定时，随着电容值增加，负载个数也会增加。此外，

可以分析出负载阻值越小，若要实现系统容纳的负载更多，所需要的电容值越大。

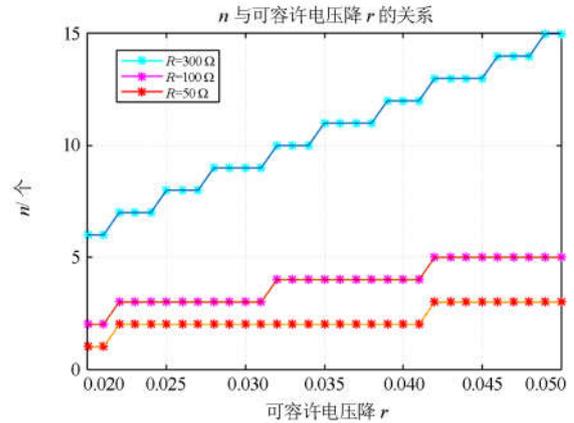


图 7 可容许电压降与负载个数之间的关系

Fig. 7 Relationship between the allowable voltage drop and the number of loads

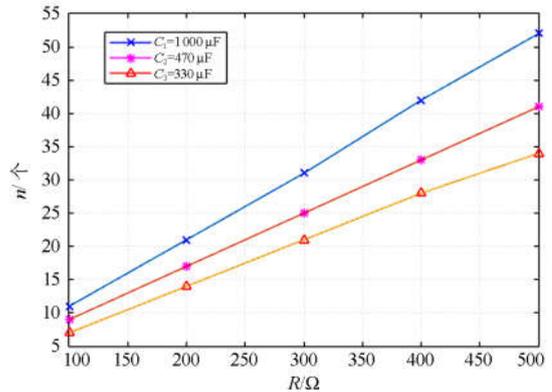


图 8 电容与负载个数之间的关系

Fig. 8 Relationship between the capacitance and the number of loads

基于上述分析，由于电力电子器件的存在，加入电容之后，不同的电容值会对负载端造成不同的影响。电容值的确定会受到系统中传输速率的影响，并不是越大越好。因此，为了使添加电容之后既能实现连续电力传输，又不影响负载特性，电容值范围的确定是尤为重要的。当系统中的传输速率使得网络中的输入阻抗的电抗部分接近零时，表明负载的输出电压与电流相位同步，此时的电容值即为最佳缓存器容量。

4 结论

为了合理设计缓存器容量大小，本文从时分复用的角度，分析了缓存器容量和负载之间的关系。

首先,将电力分组调度系统等效为一阶电路图,由于使用直流电源,对此采用三要素法对电路进行分析,得出容量关系表达式。其次,应用到电力分组调度系统中,推导出缓存器容量范围。最后,利用时分复用的思想,考虑到电力包有效载荷长度、可容许电压降等因素,解决了缓存器容量可以容许几个负载正常使用的问题。仿真结果证实了该方法的可行性,并得出可以通过减小电力包有效载荷时间长度、提高可容许电压降来增加可容纳的负载数量。若负载阻值较大,可供使用的负载数越多。另外,由于电容的存在,负载特性会受到一定的影响,因此电容值的确定是至关重要的。该方法为之后在储能方面的研究和扩展提供了一定的依据。此外,由于本文采用一根电力线进行传输,系统可容纳的负载是有限的,若要实现更多负载的使用,则需要考虑到传输线数量和其增加之后的成本,以及在此情况下如何有效调度电力的问题。

参考文献

- [1] 武艳艳,刘伟,马小琴,等.特高压直流输电系统用直流转换开关的介绍及应用[J].科技与创新,2018(3):33-35.
WU Yanyan, LIU Wei, MA Xiaoqin, et al. Introduction and application of DC converter for UHV DC transmission system[J]. Science Technology and Innovation, 2018(3): 33-35.
- [2] 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 Report, 2018, 15(11): 60-62.
- [3] 徐琪,曾杰,周文鹏,等.中压直流配电系统故障过电压水平分析[J].广东电力,2018,31(12):134-140.
XU Qi, ZENG Jie, ZHOU Wenpeng, et al. Fault overvoltage level analysis of medium voltage dc distribution system[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12): 134-140.
- [4] 熊正勇,苗虹,曾成碧,等.考虑储能系统的直流配电网综合负载特性优化[J].电测与仪表,2019:56(16):26-31.
XIONG Zhengyong, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. Considering load property of the energy storage system of DC power distribution network integrated optimization [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019: 56(16): 26-31.
- [5] 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 on DC distribution network in smart city[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(11): 131-132.
- [6] 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.
- [7] 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. Load forecasting for active distribution network in the presence of active demand[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 68-74.
- [8] ZHANG D, LI J, HUI D. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [9] 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.
- [10] NAWATA S, FUJII N, ZHOU Y Z, et al. A theoretical examination of an unexpected transfer of power packets by synchronization failure[C] // International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014). IEICE, September 14-18, 2014, Kyoto, Japan: 60-63.
- [11] ZHOU Y Z, TAKAHASHI R, HIKIHARA T. Realization of autonomous clock synchronization for power packet dispatching[J]. IEICE Transactions on Fundamentals, 2015, E98-A(2): 749-753.
- [12] 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.
- [13] 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.

[14] FUJII N, TAKAHASHI R, HIKIHARA T. Application of power packet dispatching system to stepping motor driving system[C] // The Papers of Joint Tech Meeting on Electron Devices and Semicond. Power Converter, IEE Japan, October, 2014, Japan: 53-58.

[15] 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.

[16] 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.

[17] TAKAHASHI R, TAKUNO T, HIKIHARA T. Estimation of power packet transfer properties on indoor power line channel[J]. Energies, 2012, 5(7): 2141-2149.

[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, Nuremberg, Germany: 553-557.

[19] 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.

[20] 卢艺, 戴月, 马伟哲, 等. 含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 434-444.
LU Yi, DAI Yue, MA Weizhe, et al. Distributed dynamic optimal power flow of distribution network with distributed power supply and energy storage devices[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 434-444.

[21] 苏伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 29-35.
SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of economic evaluation methods for energy storage technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 29-35.

[22] 顾博川, 尤毅, 孙毅, 等. 计及虚拟储能的社区微网联络线功率平滑方法[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 13-21.
GU Bochuan, YOU Yi, SUN Yi, et al. The power smoothing method of community micro grid connection line with virtual energy storage[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 13-21.

[23] 黄文杰, 徐修华, 竺庆茸, 等. 基于直流配电网的储能电池建模仿真及试验研究[J]. 电工电气, 2017(9): 11-14, 23.
HUANG Wenjie, XU Xiuhua, ZHU Qingrong, et al. Modeling, simulation and experimental research of energy storage battery based on DC distribution network[J]. Electrical Engineering, 2017(9): 11-14, 23.

[24] 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 Lili, 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.

[25] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41, 21.
WANG Chengmin, SUN Weiqing, YI Tao, et al. Summary of energy storage technology application planning and its benefit evaluation method in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41, 21.

[26] 赵紫玲, 代拓. 储能技术在电力系统智能微网中的应用探究[J]. 电子测试, 2013(24): 200-201.
ZHAO Ziling, DAI Tuo. Application of energy storage technology in intelligent microgrid of power system[J]. Electronic Testing, 2013(24): 200-201.

[27] TASHIRO K, TAKAHASHI R, HIKIHARA T. Feasibility of power packet dispatching at in-home DC distribution network[C] // 2012 IEEE 3rd International Conference on Smart Grid Communications, November, 2012, Tainan, Taiwan, China: 401-405.

[28] 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, 2013, Washington, USA: 4368-4373.

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-06-25

作者简介:

高冰(1982—), 男, 学士, 工程师, 主要从事电力科研开发、智能电网技术方面的工作。E-mail: dlkygb@163.com

(编辑 魏小丽)