

DOI: 10.7667/PSPC181244

基于离散傅里叶频谱分析的直流配电网储能规划配置方法

李文, 陈海东, 崔战涛, 杨宁, 王东夏, 任爱荣

(国网宁夏电力有限公司石嘴山供电公司, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 直流配电网中合理配置适当类型及容量的储能设备, 可有效抑制直流电压闪变, 提高系统运行稳定性和故障穿越能力。储能设备的配置属于直流配电网建设的前期规划设计范畴, 以配网对储能设备的功率需求样本数据为基础。首先对功率样本数据进行离散傅里叶的频谱分析, 得到低频段基础功率和高频段波动功率, 考虑储能设备的储能周期和响应速率, 采用储能电池和超级电容作为直流配电网的混合储能方案。引入权重系数对多频段的低频段基础功率进行权重优化, 配置储能电池的额定功率; 然后对多维高频段的波动功率进行更新, 在功率平衡的约束条件下配置超级电容的额定功率。同时, 引入表征储能设备荷电状态 SOC 越限次数的影响指标, 分析不同储能设备容量与影响指标之间的关系, 寻求降低影响指标的储能设备容量的临界值。最后, 以分布式新能源与负荷间的功率差额作为储能设备的功率需求样本数据, 并建立算例对储能设备的功率和容量的配置方法进行验证。

关键词: 直流配电网; 规划配置; 离散傅里叶频谱分析; 混合储能

A configuration method of energy storage device in DC distribution network based on discrete Fourier spectrum analysis

LI Wen, CHEN Haidong, CUI Zhantao, YANG Ning, WANG Dongxia, REN Airong

(Shizuishan Power Supply Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Shizuishan 753000, China)

Abstract: Reasonable configuration of proper type and capacity of energy storage device in DC distribution network can effectively suppress DC voltage flicker and promote reliable stability of system operation and fault ride-through capability. The configuration of energy storage device is the pre-planning design of the DC distribution network construction, which is based on the power supply sample data of the energy storage device in the distribution network. The discrete Fourier spectrum analysis is performed on the power sample data of the energy storage device to obtain the base power in the low frequency and the fluctuation power in the high frequency. A hybrid energy storage device is obtained considering response rate and energy storage cycle characteristics. Then, a weight coefficient is introduced to optimize the weight of the multi-dimensional power in low frequency, to configure the rated power of the energy storage battery. After that, the configuration of the rated power of the supercapacitor is proposed under the constraints of power balance. Additionally, an impact index is introduced to characterize the relationship between State Of Capacity (SOC) and capacity of the energy storage device, to seek the threshold for the capacity of energy storage device reducing the impact. The validity of the method above is verified by an example taking the power difference between distributed renewable energy and load as the sample data of power requirement for energy storage device.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China “Smart Grid Techniques and Equipments” (No. 2018YFB0905000).

Key words: DC distribution network; capacity configuration; discrete Fourier spectrum analysis; hybrid energy storage

0 引言

目前, 分布式电源以其经济环保、接入灵活和

提高能源利用率等优点, 在国内外得到广泛关注并取得快速发展。一些分布式电源的输出电能为直流, 如光伏发电和直流储能电池, 有的则在变频过程中需要将其转化为直流。因此, 相比于接入交流配电网, 分布式电源接入直流配电网具有更加灵活、减少电能转换损耗等优点^[1-2]。现阶段的直流配电网主

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项资助(2018YFB0905000)

要应用在工业园区和商业办公区的供电、船舶直流配电和直流微网等。

随着构建能源互联网缓解能源供需矛盾的迫切需要, 直流配电网成为能源互联网的关键环节^[3-5], 直流配电网能够灵活构成多端系统、不存在三相不平衡问题, 可更好地适应间歇性电源的接入, 更适合能源互联网的构建^[3]。目前国内外直流配电网主要在于研究示范阶段, 我国直流配电网的应用也有一定的研究, 如深圳建立了柔性直流配电示范工程^[6]。

储能设备的功率和容量等配置直接影响到配电网的可靠性和经济性。目前, 储能设备规划配置主要集中在交流配电网, 特别是基于交流微电网以平抑分布式新能源接入的功率波动。直流配电网中的储能设备规划配置的研究较少^[7]。

文献[8]基于光伏出力和负荷的短期预测进行误差概率统计, 利用区间估计方法来得到储能设备容量的配置函数并进行优化; 文献[9]针对配电网和微电网中分布式电源的选址定容综合对比, 从分布式电源选址定容的优化目标侧重设置、运行方式的差异、储能设备接入的位置等展开研究, 使得分布式电源选址定容方法可有效服务于实际需求; 文献[10]采用频谱分析和低通滤波结合的方法, 在微电网功率波动约束和储能设备运行状态约束条件下, 寻求满足可再生能源平滑出力需求的最优储能额定功率和容量; 文献[11]通过构建微电网的投资收益模型, 并基于系统调度和约束条件, 以光伏利用率最大和年利润最高作为目标函数, 通过遗传算法来对储能容量进行配置求解; 文献[12]以配电网的运行状态、储能设备的荷电状态等作为约束条件, 提出了一种储能设备配置的双层优化模型, 上层优化模型以储能设备总容量为优化目标, 下层优化模型考虑储能设备与高渗透的可再生能源出力相配合。

因此, 基于上述研究成果, 本文针对直流配电网中储能设备的规划配置展开研究。

1 直流配电网

1.1 直流配电网简介

直流配电网的网络结构主要分为环形网络和辐射状网络。环形网络直流配电网在提高供电可靠性和维持电压水平上具有更大的优势, 具有更好的应用前景, 但也存在故障识别和控制保护难度增加等问题; 辐射状网络直流配电网可较好地适应多负荷落点。直流配电网供电的结构如图 1。

1.2 运行约束条件

直流配电网中, 储能设备容量的配置应考虑其运行功率和状态、直流配电网中的功率平衡和

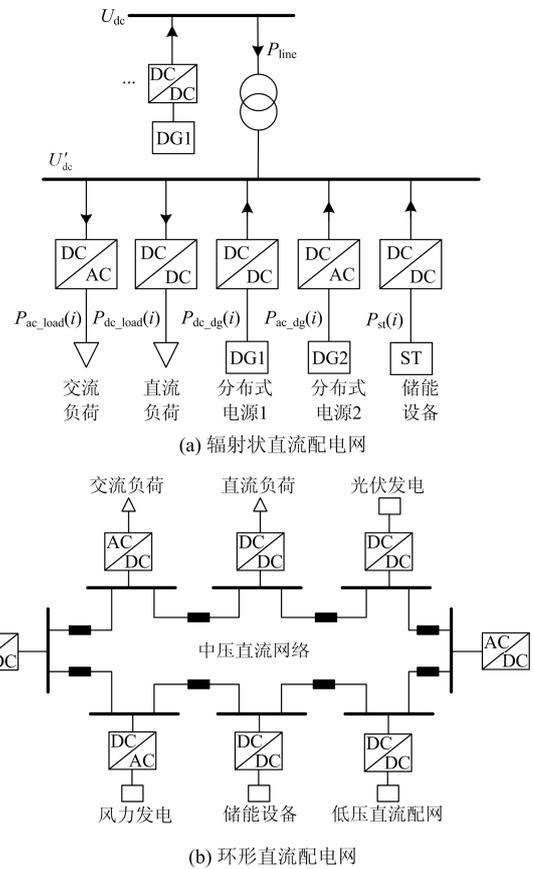


图 1 直流配电网

Fig. 1 DC distribution network

直流电压波动等约束条件。

(1) 运行功率的约束

储能设备充放电时, 运行功率不超过其充放电功率的上下限。

$$P_{st_min}(i) \leq P_{st}(i, t) \leq P_{st_max}(i) \quad (1)$$

式中: $P_{st_min}(i)$ 和 $P_{st_max}(i)$ 分别为第 i 个储能设备运行功率的下限和上限; $P_{st}(i, t)$ 为第 i 个储能设备在 t 时刻的运行功率。

(2) 运行状态的约束

每个控制周期 Δt 内, 储能设备的功率变化 $\Delta P_{st}(i, t)$ 应小于最大允许的功率变化值 ΔP_{ε} 。

$$\Delta P_{st}(i, t) = |P_{st}(i, t) - P_{st}(i, t - \Delta t)| \leq \Delta P_{\varepsilon} \quad (2)$$

储能电池的荷电状态应保持在上下限值范围内。

$$S_{OC\ min}(i) \leq S_{OC}(i, t) \leq S_{OC\ max}(i) \quad (3)$$

式中: $S_{OC\ min}(i)$ 和 $S_{OC\ max}(i)$ 分别表示第 i 个储能设备荷电状态的最小值和最大值; $S_{OC}(i, t)$ 为第 i 个储能设备的荷电状态。

(3) 直流配电网的平衡约束

直流配电网应满足功率平衡约束, 图 1(a)的约束如式(4)。

$$P_{\text{line}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ac_dg}}} P_{\text{ac_dg}}(i) + \sum_{i=1}^{N_{\text{dc_dg}}} P_{\text{dc_dg}}(i) + \sum_{i=1}^{N_{\text{st}}} P_{\text{st}}(i) = \sum_{i=1}^{N_{\text{ac_load}}} P_{\text{ac_load}}(i) + \sum_{i=1}^{N_{\text{dc_load}}} P_{\text{dc_load}}(i) \quad (4)$$

式中： P_{line} 为配电联络线的传输功率；交流负荷和直流负荷的个数分别为 $N_{\text{ac_load}}$ 和 $N_{\text{dc_load}}$ ；第 i 个负荷的功率分别为 $P_{\text{ac_load}}(i)$ 和 $P_{\text{dc_load}}(i)$ ；交流分布式电源和直流分布式电源的个数分别为 $N_{\text{ac_dg}}$ 和 $N_{\text{dc_dg}}$ ；第 i 个分布式电源的功率分别为 $P_{\text{ac_dg}}(i)$ 和 $P_{\text{dc_dg}}(i)$ ；储能设备的个数为 N_{st} ；第 i 个设备的功率为 $P_{\text{st}}(i)$ ， $P_{\text{st}}(i) > 0$ 表征储能设备放电， $P_{\text{st}}(i) < 0$ 表征储能设备充电。

因此，储能设备提供部分功率支撑以维持功率平衡。

(4) 直流电压波动

根据规范《工业与民用配电设计手册》^[13]，直流电压波动 $\Delta u\%$ 可由式(5)进行计算。

$$\Delta u\% = \frac{P_{\text{line}} \cdot l}{C \cdot S_{\text{line}}} \quad (5)$$

式中： P_{line} 为联络线传输功率； l 为联络线长度； C 为计算系数， S_{line} 为联络线截面。

2 直流配电网中储能设备的规划配置

直流配电网中，合理规划适当类型、适当容量的储能设备可有效抑制直流电压的闪变，提高配电网运行的稳定性和故障穿越能力。因此，针对直流配电网中储能设备的规划配置展开研究。

2.1 储能设备的类型

储能设备根据应用技术可分为抽水蓄能、压缩空气储能、锂电池储能和超级电容储能等，不同类型设备的储能特性、规模和成本各有差别^[14-16]。部分储能设备的特性如表 1^[17]。直流配电网中储能设备的选择综合考虑储能设备的响应时间、储能周期和设备规模等因素。

表 1 储能设备的参数

Table 1 Parameters of energy storage device

储能技术	储能周期	全功率响应时间	规模/MW
压缩空气	数分钟至数月	分钟级	1~300
储能电池	数分钟至数天	百毫秒级	0.1~30
超级电容	数秒	毫秒至几十毫秒级	0~1

2.2 储能设备的选择和组合

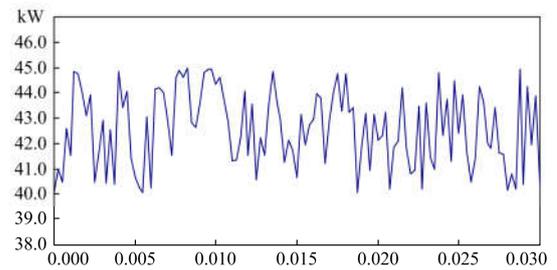
为平滑直流配电网的功率波动，根据分布式电源和负荷的功率差额，得到直流配电网对储能设备的功率需求样本数据。

对功率需求样本数据 P_g 进行离散傅里叶变换，可得到各频段的幅频结果 S_g 和 f_g ^[10,18]。

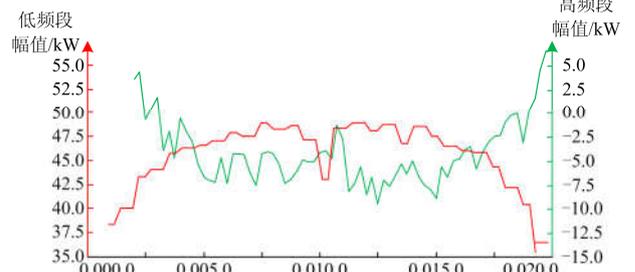
$$\begin{cases} S_g = F(P_g) = [S_g[1], \dots, S_g[n], \dots, S_g[N_s]]^T \\ f_g = [f_g[1], \dots, f_g[n], \dots, f_g[N_s]]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中： P_g 为功率需求的样本数据； N_s 为采样点个数； $F(P_g)$ 表示对 P_g 进行离散傅里叶变换； $S_g[n]$ 为傅里叶变换的第 n 个频率的幅值； f_g 表示与 S_g 对应的频率列向量。

通过频谱分析，将功率需求分解得到低频段的基础功率和高频段的波动功率，如图 2 所示。



(a) 储能设备的功率响应



(b) 功率响应的频谱分析

图 2 储能设备的功率响应分析

Fig. 2 Power response analysis of energy storage device

因此，直流配电网中考虑储能电池和超级电容结合的混合储能模式。储能电池的储能周期较长，响应时间在百毫秒级，可提供低频段的功率响应；超级电容的储能周期较短，响应时间在毫秒级，可快速提供高频段的功率响应。

2.3 储能设备的功率配置

根据配电网对储能设备的功率需求，四种典型的功率配置方案如图 3。

(1) 方案 1 中混合储能提供的总功率响应小于功率需求，直流配电网的可靠性下降。

(2) 方案 2 中混合储能提供的总功率响应满足功率需求，可有效平抑直流配电网的功率波动。

(3) 方案 3 中混合储能提供的总功率响应大于功率需求，且储能电池提供的基础功率大于功率需求，直流配电网的供电灵活性上升。

(4) 方案 4 中混合储能提供的总功率响应进一步上升, 直流配电网的供电灵活度继续提升, 但配电网的经济性下降。

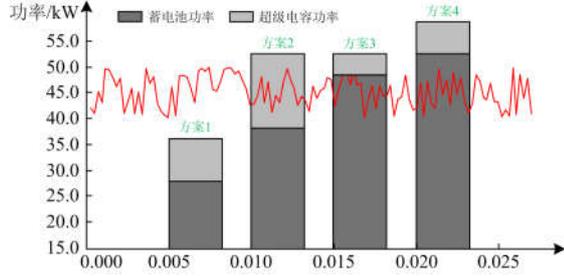


图 3 混合储能的功率配置方案

Fig. 3 Capacity allocation scheme for hybrid energy storage

若功率需求的样本数据长度为 T_p , 储能电池储能的控制周期为 T_{bat} , 则功率需求的样本数据维数 M 为

$$M = \text{Round}\left(\frac{T_p}{T_{bat}}\right) \quad (7)$$

式中: $\text{Round}()$ 为向下取整函数; M 维向量均包含 N_s 个采样点。

根据式(1)的频谱分析结果, 取功率样本数据的低频段、高频段分别为 $[f_g[1], \dots, f_g[[N_{s1}]]$ 和 $[f_g[[N_{s1}]], \dots, f_g[[N_s]]$ 。因此可得到第 i 维的混合储能的功率响应为

$$\begin{cases} P_{bat} = [P_{bat}(1), \dots, P_{bat}(i), \dots, P_{bat}(M)]^T \\ P_{bat}(i) = S_g[1] + \dots + S_g[[N_{s1}]] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{cap} = [P_{cap}(1), \dots, P_{cap}(i), \dots, P_{cap}(M)]^T \\ P_{cap}(i) = P_g[i] - P_{bat}(i) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{bat}(i)$ 为储能电池的运行功率; $P_{cap}(i)$ 为超级电容的运行功率。

因此, 储能电池和超级电容的额定功率 P_{bat_B} 和 P_{cap_B} 应满足式(10)。

$$\begin{cases} P_{bat_B} \geq \max(P_{bat}(1), \dots, P_{bat}(i), \dots, P_{bat}(M)) \\ P_{cap_B} \geq \max(P_{cap}(1), \dots, P_{cap}(i), \dots, P_{cap}(M)) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\max()$ 为取最大值的函数。

(1) 储能电池的额定功率

实际上, 各时刻直流配电网的功率需求各不相同, 特别是白天负荷高峰和夜晚负荷低谷时, 这造成了储能电池 M 维的 $P_{bat}(i)$ 存在差异。个别情况下, $P_{bat}(i)$ 过高会导致储能电池的额定功率过大, 规划的经济性下降。

因此, 引入权重系数以综合评估储能电池的功率配置。权重系数反映了各维数据的可靠性大小及

其对最终综合评估结果的影响程度。

储能电池的额定功率 P_{bat_B} 的配置计算如式(11)。通过以方差倒数为权, 寻求 M 维数据中最合适的权重, 以保证取期望值 P_{bat_B} 的方差最小。

$$\begin{cases} P_{bat_B} = \sum_{i=1}^M \omega(i) \cdot P_{bat}(i) \\ \omega(i) = \frac{\sigma_i^{-2}}{\sum_{j=1}^M \sigma_j^{-2}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\omega(i)$ 为第 i 维储能电池运行功率 $P_{bat}(i)$ 的权重系数; σ_i^2 为第 i 维储能电池运行功率 $P_{bat}(i)$ 的方差。

权重系数的引入使得储能电池的额定功率更趋近于重要性程度最高的响应功率的值, 相较于式(10)的约束条件, 优化额定功率的配置。

(2) 超级电容的额定功率

储能电池的额定功率 P_{bat_B} 确定后, M 维样本数据中超级电容支撑的高频功率如式(9), 进一步修正为

$$\begin{cases} P_{cap} = [P_{cap}(1), \dots, P_{cap}(i), \dots, P_{cap}(M)]^T \\ P_{cap}(i) = P_g[i] - \frac{P_{bat_B}}{k_{bat}(i)} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $k_{bat}(i)$ 为第 i 维样本数据中储能电池的运行功率裕度系数, 如式(13)。

$$k_{bat}(i) = \begin{cases} 1 \sim \frac{P_{bat_B}}{P_{bat}(i)} & (P_{bat}(i) < P_{bat_B}) \\ 1 & (P_{bat}(i) \geq P_{bat_B}) \end{cases} \quad (13)$$

当 $k_{cap}(i)$ 值越小, 储能电池增加功率输出越明显, 这能够有效降低超级电容的运行功率, 特别是超级电容荷电状态 SOC 临近上下限时, 可为超级电容提供额外的功率进行充电或放电。

因此, 结合式(12), 超级电容的额定功率配置如式(14), 通过储能电池的输出功率裕度系数, 可降低了超级电容支撑的高频功率, 从而优化超级电容的额定功率配置。

$$\begin{cases} P_{cap_B} \geq \max(P_{cap}(1), \dots, P_{cap}(i), \dots, P_{cap}(M)) \\ P_{cap}(i) = P_g[i] - \frac{P_{cap_B}}{k_{bat}(i)} \end{cases} \quad (14)$$

2.4 储能设备的容量配置

阶段时间 $[t-T, t]$ 内, 储能设备的充放电电量 $E_{st}(t)$ 可计算如式(15)。为简化计算, 此处以线性化的方式忽略储能设备内部更精确的充放电特性^[19-20]。

$$E_{st}(t) = \sum_{i=1}^{\text{Round}\left(\frac{T}{\Delta t_s}\right)} P_{st}(i) \cdot \Delta t_s \quad (15)$$

式中： Δt_s 储能设备的控制周期； $P_{st}(i)$ 为储能设备第 i 个控制周期的运行功率。

荷电状态 SOC 可反映储能设备的剩余电量，SOC 计算为

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-T) - \frac{E_{st}(t)}{E_{st_B}} \quad (16)$$

式中： $S_{OC}(t)$ 和 $S_{OC}(t-T)$ 分别表示 t 和 $t-T$ 时刻的荷电状态； E_{st_B} 为储能设备的额定容量。当储能设备充电， $E_{st}(t)$ 为负值， $S_{OC}(t)$ 增加；当储能设备放电， $E_{st}(t)$ 为正值， $S_{OC}(t)$ 降低。

定义影响指标 $I_{ndex}(S_{OC})$ ，以表征容量对储能设备荷电状态 SOC 越限次数的影响。通过分析不同储能设备容量与影响指标之间的关系，寻求降低影响指标的储能设备容量的临界值。

$$I_{ndex}(S_{OC}) = \sum_{i=1}^{int(\frac{T}{\Delta t_s})} K_{st}(i) \quad (17)$$

式中， $K_{st}(i)$ 为表征 SOC 越限的 0~1 二值函数，可计算如式(18)。

$$K_{st}(i) = \begin{cases} 1 & (S_{OC}(i) \geq S_{OC_max}(i) \text{ or } S_{OC}(i) \leq S_{OC_min}(i)) \\ 0 & (S_{OC_min}(i) < S_{OC}(i) < S_{OC_max}(i)) \end{cases} \quad (18)$$

3 算例验证

为了验证混合储能设备的配置方法，以图 1 (a) 中低压侧实际负荷设备和光伏设备的功率差额，作为储能设备的功率样本数据，以保证低压配电网离网运行仍具有较高的可靠性。

功率样本数据采样时，应考虑 3 个约束条件：

- (1) 样本数据应包含正负值，即储能设备存在充电或放电的状态切换；否则 SOC 会持续触发如式(18)的上下限值，影响指标 $I_{ndex}(S_{OC})$ 持续增大，无法求解；
- (2) 具备数据采集条件下，样本数据应尽可能含多维数，使得采用式(11)权重系数计算的额定功率更贴近最优值；
- (3) 若考虑储能设备的远期配置，功率需求样本数据采样后应考虑未来负荷和分布式电源接入功率的增长，使得配置方案更具灵活性。

实际负荷、光伏设备采集数据如图 4，采集频率 100 Hz，样本数据长度 9 min，样本数据维数 $M=9$ 。样本数据内，光照强度稳定，光伏设备的功率波动较小；负荷设备采用动态负荷，样本数据内存在一定波动。

(1) 储能设备的额定功率选择

多维样本数据中的配电网功率需求平均值如表 2。将多维样本数据进行离散傅里叶变换可得储能电

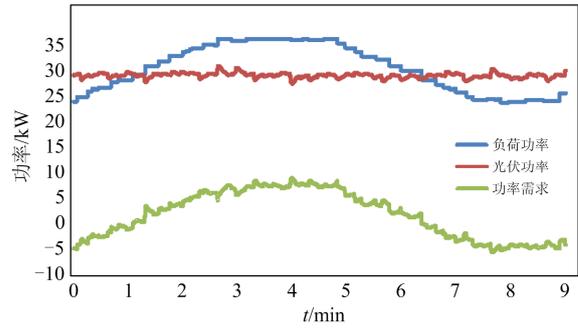


图 4 储能设备的功率需求数据

Fig. 4 Power demand data for hybrid energy storage

池的功率响应值 $P_{bat}(i)$ ，根据式(11)对多维功率响应值进行权重系数的计算，如表 2。

表 2 储能电池的功率配置

Table 2 Power configuration of energy storage battery

时间序列/min	储能电池的功率响应 $P_{bat}(i)/kW$	权重系数
1	-3.98	0.056 759 927
2	-1.06	0.126 915 961
3	3.28	0.148 691 816
4	4.94	0.095 285 362
5	7.39	0.049 224 005
6	4.41	0.110 642 894
7	0.62	0.180 399 183
8	-1.33	0.117 962 874
9	-1.45	0.114 118 603

根据式(11)可求得，储能电池的额定功率为 2.6 kW，取整为 3 kW。

储能电池的额定功率确定后，对多维超级电容支撑的高频功率进行更新，计算如表 3。

表 3 超级电容的功率配置

Table 3 Power configuration of super capacitor

时间序列/ min	储能电池的功率响应 $P_{bat}(i)$	超级电容的功率响应 $P_{cap}(i)$	超级电容的 1 min 内波动功率
1	-3.98	1.61	-1.37~3.37
2	-1.06	6.63	0.41~5.00
3	3.28	2.53	0.66~3.92
4	4.94	2.19	0.43~3.66
5	7.39	-0.25	-2.31~1.13
6	4.41	-1.01	-2.76~1.05
7	0.62	-1.54	-4.48~1.20
8	-1.33	-3.21	-4.69~0.89
9	-1.45	-3.16	-3.74~2.11

因此，根据式(14)可得到超级电容的功率最小值应大于 6.63 kW。考虑 1 min 内的高频功率波动，

取 $P_{\text{cap}_B}=7 \text{ kW}$ 。

(2) 储能设备的额定容量选择

假定储能设备的初始 $S_{\text{OC}}=0.5$, $S_{\text{OC}_{\min}}(i)$ 取值为 0.2; $S_{\text{OC}_{\max}}(i)$ 取值为 0.9。

超级电容的额定容量与影响指标 $I_{\text{index}}(S_{\text{OC}})$ 的关系如图 5。可以看出, 当超级电容的额定容量为 0.08 kW·h 接近临界值, SOC 的越界指标接近于 0。220 V 直流电压下, 忽略其详细的储能特性时, 其容量近似也可表征为 0.364 Ah。

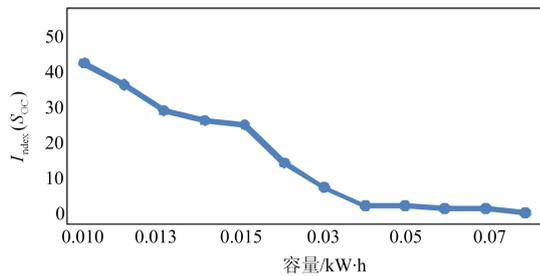


图 5 超级电容的容量与影响指标的关系

Fig. 5 Relationship between super capacitor and impact index

储能电池的额定容量与影响指标 $I_{\text{index}}(S_{\text{OC}})$ 的关系如图 6。可以看出, 当储能电池的额定容量大于 0.09 kW·h, SOC 的越界指标为 0。值得说明的, 因储能电池的控制周期较长, 功率响应样本数据维数越大, 其容量配置越精确。9 min 样本数据只确定了此样本内储能电池容量应满足的最小值。

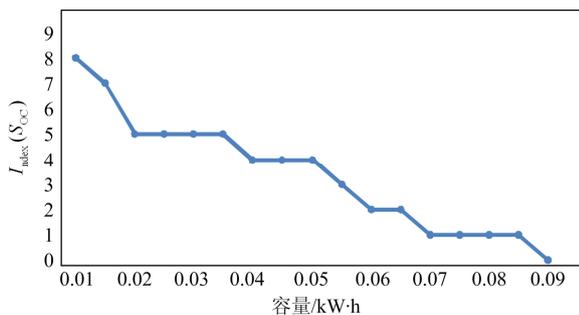


图 6 储能电池的容量与影响指标的关系

Fig. 6 Relationship between energy storage battery and impact index

(3) 直流电压的波动

直流电压等级为 220 V, 取直流联络线的型号为 LGJ-2×25 mm², 长度 l 为 1 km, 计算系数 C 为 7.66, 根据式(5)求得未投入储能和投入储能的电压波动对比如图 7。可以看出, 储能设备投入后, 直流电压波动明显降低。

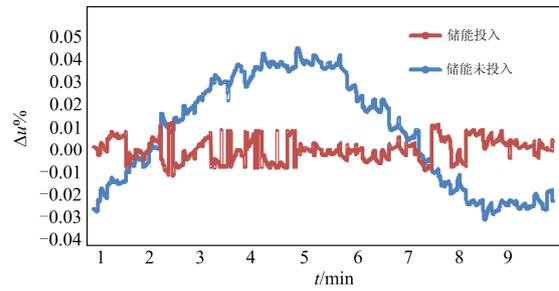


图 7 直流电压波动

Fig. 7 DC voltage fluctuation

4 结论

本文针对直流配电网中储能设备的规划配置展开研究, 采用储能电池和超级电容结合的混合储能模式来响应直流配电网的功率需求, 同时对混合储能设备的功率和容量配置进行研究, 并得到以下结论:

(1) 通过离散傅里叶变换对储能设备的功率响应进行频谱分析, 可得到低频段基础功率和高频段波动功率。结合储能设备的动态响应特性, 可采用储能电池和超级电容结合的混合储能模式。

(2) 引入响应功率的权重系数和表征容量对储能设备荷电状态 SOC 越限次数的影响指标, 可对储能设备的额定功率和容量的优化配置提供参考。

(3) 直流配电网中采用混合储能模式来平滑系统的功率变化, 可有效降低直流电压波动。

参考文献

- [1] BOROYEVICH D, CVETKOVIĆ I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C] // 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 20-22, 2010, Basov, Romania: 1369-1380.
- [2] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170. YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [3] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19. SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. Overview of research on Intelligent DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [4] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1): 133-148.
- [5] TSOUKALAS L H, GAO R. From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures and requirements[C] // International Conference on Electric

- Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9, 2008, Nanjing, China: 94-98.
- [6] 刘国伟, 赵宇明, 袁志昌, 等. 深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 1-7. LIU Guowei, ZHAO Yuming, YUAN Zhichang, et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC-DC distribution system in Shenzhen[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 1-7.
- [7] 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.
- [8] 林少伯, 韩民晓, 赵国鹏, 等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 25-33. LIN Shaobo, HAN Minxiao, ZHAO Guopeng, et al. Capacity allocation of energy storage in distributed photovoltaic power system based on stochastic prediction error[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 25-33.
- [9] 李军, 颜辉, 张仰飞, 等. 配电网和微网中分布式电源选址定容方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 147-154. LI Jun, YAN Hui, ZHANG Yangfei, et al. Comparison of locating and sizing methods of DGs between in micro-grids and in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 147-154.
- [10] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700-3706. SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [11] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716. ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [12] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165. TAO Qiong, SANG Bingyu, YE Jilei, et al. Optimal configuration method of distributed energy storage systems in distribution network with high penetration of photovoltaic[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2158-2165.
- [13] 任任. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [14] 门向阳, 曹军, 王泽森, 等. 能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5727-5737. MEN Xiangyang, CAO Jun, WANG Zesen, et al. The constructing of multi-energy complementary system of energy internet microgrid and energy storage model analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5727-5737.
- [15] 马溪原, 周长城, 刘育权, 等. 工业园区用户侧电池储能系统运营模式及其经济性分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 32-36. MA Xiyuan, ZHOU Changcheng, LIU Yuquan, et al. Business mode and economic analysis of user-side battery energy storage system in industrial parks[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 32-36.
- [16] 米增强, 余洋, 王璋奇, 等. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8. MI Zengqiang, YU Yang, WANG Zhangqi, et al. Application prospect analysis of large scale energy storage technology in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [17] LUO Xing, WANG Jihong, DOONE R M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [18] 李滨, 梁宇帆, 祝靖, 等. 一种分布式光伏选线定容的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 113-122. LI Bin, LIANG Yufan, ZHU Jing, et al. A second-order cone programming method of feeder-selecting and sizing for distributed photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 113-122.
- [19] 沈欣炜, 朱守真, 郑亮宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920. SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.
- [20] 黄玉龙. 微电网的容量优化及可靠性分析[D]. 济南: 山东大学, 2015. HUANG Yulong. Capacity optimization and reliability analysis of microgrid[D]. Jinan: Shandong University, 2015.

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-12-10

作者简介:

李文(1968—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为配电网运行和规划; E-mail: zhuxukai@vip.126.com

陈海东(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网运行与规划; E-mail: 395034618@qq.com

崔战涛(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为配电网运行与规划. E-mail: 77571195@qq.com

(编辑 姜新丽)