

考虑平抑直流故障后功率波动的储能系统 选址配置方法

吴盛军¹, 李强¹, 彭维馨², 李泽文²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:多馈入直流系统在受端交流故障发生后, 易导致多条直流同时换相失败造成系统功率的大量短缺, 产生有功功率波动。为实现对多馈入直流输电系统受端交流故障后电网功率波动的有效抑制, 从交直流交互作用强度及有功功率关键节点、线路的角度出发, 提出一种平抑换相失败后交流系统有功功率波动的储能系统选址布点方法。首先依据多馈入交互作用因子确定候选区域, 然后由多馈入有效短路比确定候选站点, 最后以全网有功功率波动率确定储能系统具体选址位置。基于修改的 IEEE-39 节点系统, 在 PSCAD 中搭建仿真模型, 通过仿真验证, 提出的储能系统选址方法能够有效减少受端交流故障导致直流换相失败带来的功率波动, 提高交流系统的稳定性。

关键词:储能系统; 多直流馈入; 有功功率波动; 多馈入有效短路比; 直流换相失败

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.005 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2023)01-0035-08

Site selection and configuration method of energy storage system for suppressing power fluctuation after DC fault

WU Shengjun¹, LI Qiang¹, PENG Weixin², LI Zewen²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: After the receiving-end AC fault occurs in the multi-infeed HVDC system, it is easy to cause simultaneous commutation failure of multiple DCs, resulting in a large quantity of power shortage and active power fluctuation. In order to achieve effective suppression of grid power fluctuation after the receiving-end AC faults in the multi-infeed HVDC transmission system, from the perspective of AC/DC interaction strength and the critical nodes and lines of active power, a siting method of the energy storage system is proposed for suppressing power fluctuation of the AC system after commutation failure is proposed. Firstly, the candidate areas are determined according to the multi-infeed interaction factor (MIIF), and then the candidate sites are determined by the multi-infeed effective short circuit ratio (MIESCR). Finally, the specific location of the energy storage system is determined by the active power fluctuation rate of the whole network (APFRWN). The simulation results are verified in PSCAD based on the modified IEEE-39 bus system. The location method of the energy storage system proposed in this paper can effectively reduce the power fluctuation caused by DC commutation failure caused by AC fault at the receiving end and improve the stability of the AC system.

Key words: energy storage system; multi-infeed; active power fluctuation; MIESCR; DC commutation failure

收稿日期: 2020-12-10; 修回日期: 2022-05-23

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5419-201918206A-0-0-00)

通信作者: 李泽文(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与控制、电力设备能效优化研究; E-mail: lzw0917@163.com

随着特高压直流输电在“西电东送,北电南送”战略实施中的广泛应用^[1-4],中国华东电网和广东电网已经形成了规模庞大、运行复杂的多馈入直流输电系统^[5-6]。对于这种交直流联系紧密的电网结构,当受端交流系统某处发生故障时,不仅会引起相邻区域的功率波动,甚至会导致直流换向失败,造成暂态功率倒向^[7-8]。储能系统由于具有能量转换效率高、安装灵活方便、可以快速充/放电等特点,在平抑新能源并网功率波动、参与电网调频控制、缓解常规机组调峰压力、提高新能源消纳水平等方面得到了广泛应用^[9-12]。因此,在受端电网中引入电化学储能电站能够有效地抑制故障后的功率波动,从而提高电网安全稳定性。

目前,关于储能系统选址布点的研究大多数都是针对新能源大规模并网功率波动^[13-14]、提高经济效益^[15-16]、含新能源电网调峰调频^[17-18]等问题来进行。文献[13]提出一种考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网的储能配置策略,实现对光伏出力大幅度波动的有效平抑;文献[14]以新能源输出功率频谱分析结果为基础,提出一种储能系统容量优化方法,并给出满足经储能系统补偿之后的目标功率输出波动率约束下的储能系统最小容量方案;文献[15]立足于配电网对可再生分布式电源的主动适应过程,以投资周期经济收益最高为目标,提出考虑网络动态重构的分布式电源选址定容优化方法;文献[16]以储能系统配置成本、污染性气体排放量最少为目标,提出以容量、配网经济最优的模型,采用不同的求解方式,实现了储能系统的优化规划;文献[17]综合考虑储能系统调峰费用、火电机组调峰费用以及储能调峰收益等模型,提出面向调峰的储能系统技术经济模型;文献[18]以储能系统用于削峰填谷、提高电能质量等多个功能为目标,建立多目标寻优模型,实现储能电站在配网中的最优规划。随着中国在直流输电方面的深入研究、大规模提倡及战略性建设,“强直弱交”的特点越发突出,给多馈入直流系统的安全稳定提出了巨大挑战,而针对多馈入直流输电系统换相失败后有功功率抑制的储能系统选址布点策略却鲜有研究。

因此,为了实现对多馈入直流输电系统受端交流故障后电网功率波动的有效抑制,本文从交流直流交互作用强度及有功功率关键节点、线路的角度出发,在考虑多馈入交互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)、多馈入有效短路比(multi-infeed effective short circuit ratio, MIESCR)及全网有功功率波动率(active power fluctuation rate of the whole network, APFRWN)后,提出一种平抑换相失败后交流系统有功功率波动的储能系统选址布点方法,并在PSCAD中基于修改的IEEE-39节点系统构建多馈入直流输电系统仿真模型,以验证本文布点方法的正确性。

1 储能系统选址方法

1.1 确定选址区域

随着直流输电线路集中馈入同一受端交流系统条数的增加,以及受端电网电气距离的不断缩小,不同直流换流站之间的交互作用越来越强。当一处换流站发生换相失败时,有可能导致其他换流站同时/相继发生换相失败,即受端电网中发生故障或受到剧烈扰动时,引发多回直流线路同时换相失败的可能性大大增加,最终导致受端电网有功功率的大量缺额,影响系统稳定性。 f_{MIIF} 表示2条直流母线之间电压变化的比值关系,反映了2个换流站之间电压交互的强度,可以用来衡量同时换相失败可能性^[19],其定义为

$$f_{\text{MIIF},ji} = \frac{\Delta U_j\%}{\Delta U_i'1\%} \quad (1)$$

即当第*i*条换流母线投入对称三相电抗器使得该母线上的电压 U_i 降落1%时,第*j*条换流母线的电压变化百分率为 $\Delta U_j\%$ 。

由文献[20]可知,式(1)可以进行如下等价变换:

$$f_{\text{MIIF},ji} = \frac{\Delta U_j\%}{\Delta U_i'1\%} = \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \right| \quad (2)$$

式中, Z_{ij} 为第*i*、*j*个换流站之间的等值互阻抗; Z_{ii} 为第*i*个换流站的等值自阻抗。 $f_{\text{MIIF},ji}$ 的值越大,说明换流站间的交互作用越强。当其中一个换流站因

受端交流故障发生换相失败时,更容易导致其他换流站同时换相失败。在工程实际运用中,对于 $f_{\text{MIF},ji} < 0.15$ 的2个换流站,可以将其看作2个单馈入直流系统,即可以忽略它们之间的相互影响^[21]。求取各换流站间的 $f_{\text{MIF},ji}$,并按从大到小的顺序进行排序,便可以初步将容易同时发生换相失败的直流受端区域定为储能系统最优选址区域。

1.2 确定选址线路

多直流的集中馈入致使受端交流系统的支撑能力相对削弱的同时加强了交直流系统间的交互作用,使得因交流故障出现直流换相失败的可能性增加。交直流交互作用的强度通常采用短路比来表征,对于多馈入直流输电系统,考虑到各回直流间的相互影响,本文引用工程中普遍使用的多馈入有效短路比来从侧面综合反映交直流系统间的耦合关系。另外考虑到各条直流线路传输功率可能不同,可由功率基准比(power based ratio, PBR)^[22]来表征:

$$P_{\text{PBR},i} = \frac{P_{\text{di}}}{P_{\text{dj}}} \quad (3)$$

式中, P_{di} 、 P_{dj} 分别为第 i 、 j 条直流线路的传输功率。

MIESCR指标的定义为

$$f_{\text{MIESCR},i} = \frac{1}{P_{\text{PBR},i}} \left(\frac{1}{|Z_{i,\text{pu}}//Z_{i0,\text{pu}}|} - B_{i,\text{pu}} \right) \quad (4)$$

式中, $f_{\text{MIESCR},i}$ 为第 i 条直流回路的多馈入有效短路比指标; $Z_{i,\text{pu}}$ 为第 i 个换流器对应的交流系统的等值阻抗; $Z_{i0,\text{pu}}$ 为其余换流器与换流器第 i 个耦合的交流系统等值阻抗和; $B_{i,\text{pu}}$ 为对应滤波器及无功补偿的电纳标么值。 $f_{\text{MIESCR},i}$ 的值越大,受端交流系统的电压支撑能力就越强,当发生交流故障时,换流母线发生连续换相失败并导致直流系统闭锁使受端系统因功率缺额失稳的可能性就越小。文献[23]在研究了MIESCR指标的物理意义之后,对交直流受端系统强度进行了划分:①极弱系统中 $f_{\text{MIESCR},i} < 1.6$;②弱系统中 $1.6 < f_{\text{MIESCR},i} < 2.5$;③强系统中 $f_{\text{MIESCR},i} > 2.5$ 。通过求取文1.1划定的选址区域中各回直流线路的 $f_{\text{MIESCR},i}$,按从小到大的顺序进行排序,便可以进一步将直流线路以及其出线的一、二

级断面节点作为储能系统最优选址的位置。

1.3 确定选址站点

当直流系统发生换相失败时,该回线路直流向受端电网馈入的有功功率将迅速下降甚至中断,由此最终形成全网络的有功功率波动。本文以全网有功功率波动率 f_{APFRWN} 作为指标,选择出最佳储能系统的选址节点,即以某节点各出线分别发生单位有功功率变化后,系统中其余各线路的功率变化率来表示该节点对系统各线路有功功率的影响水平,并找出影响最大的节点作为储能系统的选址节点,以达到储能系统对全网有功功率波动抑制效果最佳。

$$f_{\text{APFRWN},i} = \frac{\sum_k^K \sum_j^J \frac{|P_{kj,\text{min}} - P_{j0}|}{P_{jN}}}{KJ} \quad (5)$$

式中, $f_{\text{APFRWN},i}$ 为第 i 个节点出线发生单位有功功率变化后的全网有功功率波动率; K 为节点第 i 个的出线条数; J 为除第 i 个节点一条出线以外的线路条数; $P_{kj,\text{min}}$ 为第 i 个节点第 k 条出线发生单位有功功率变化后第 j 条线路有功功率最小值; P_{j0} 为发生单位有功功率变化前第 j 条线路的初始有功功率; P_{jN} 为第 j 条线路的额定容量。

$f_{\text{APFRWN},i}$ 表示第 i 个节点各出线发生单位有功功率变化后受端系统其余线路输送有功功率的变化情况,其值越大代表着该节点有功功率出现波动时受端系统整体有功波动的程度越大,也即该节点为系统的“有功功率关键节点”。通过计算文1.2中选出的直流线路落点及其出线一、二级断面节点的 $f_{\text{APFRWN},i}$,并按从大到小的顺序进行排序,便可以找出“有功功率关键节点”,并且以此作为储能系统的最优选址站点。

2 储能系统定容方法

直流换相失败引起的功率瞬降对交流系统而言可视作短暂的功率冲击,这将导致直流落点处附近机组的功角振荡甚至失稳。同时,由此引起的潮流转移会激发整个交流系统的功率振荡。本文考虑最坏的情况,对选取的储能系统最优选址站点所属直流线路作同时换相失败处理,以交流系统在直

流连续换相失败至恢复过程中的功率变化情况作为样本片段,计算储能系统的实际出力功率,并在考虑储能电池的荷电状态(state of charge, SOC)指标后,最终确定储能系统在某站点处的容量配置。

2.1 储能系统功率的确定

1)确定换相失败后交流系统的功率 P_g ,设直流输送功率为 P_d ,发电厂功率为 P_c ,交流系统负荷为 P_L ,则有

$$P_g = P_L - P_d - P_c \quad (6)$$

$$P_{g,m} = P_{L,m} - P_{d,m} - P_{c,m} \quad (7)$$

式(6)、(7)中, $P_{g,m}$ 、 $P_{d,m}$ 、 $P_{c,m}$ 、 $P_{L,m}$ 分别为第 m 个采样点对应的功率值; $m = 1, 2, \dots, M$,其中 M 为样本片段的总采样点数。

2)由于化学电池在充放电过程中会存在一定的损耗,所以储能系统在运行过程中也会产生损耗。考虑到本文所设计的储能系统主要是用来改善因直流换相失败而导致的受端交流系统有功功率波动问题,所以对储能系统的充放电效率给与重视,设 η 为储能系统的综合效率, η_d 、 η_c 分别为放电效率和充电效率,则该储能系统的实际输出功率为

$$P_{ES,m} = \begin{cases} \frac{P_{g,m} - P_{g0}}{\eta_d}, & P_{g,m} - P_{g0} \geq 0 \\ (P_{g,m} - P_{g0})\eta_c, & P_{g,m} - P_{g0} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{g0} 为换相失败前交流系统的初始功率。

若充、放电效率相等,则有

$$\eta_d = \eta_c = \sqrt{\eta} \quad (9)$$

3)将储能系统输出功率的最大值作为其额定功率,即

$$P_{ES,N} = \max |P_{ES,m}| \quad (10)$$

2.2 储能系统容量的确定

1)将储能系统的输出功率在样本片段内进行累加,便可确定储能系统要补充的功率为

$$E = \sum_{m=0}^M \frac{P_{ES,m} T_s}{3600} \quad (11)$$

式中, T_s 为采样时间,s。 $T_s/3600$ 的意义在于将单位由s换算为h。

2)在获取了储能系统要补充的功率后,为了保证储能系统不会过充或过放,减少对电池储能的损害,延缓电池储能的运行寿命,考虑储能系统的荷

电状态约束,可最终确定储能系统的额定容量为

$$E_N = \frac{E}{S_{up} - S_{low}} \quad (12)$$

式中, S_{up} 、 S_{low} 分别为储能系统运行SOC的上、下限约束,一般取为 $S_{up} = 1$ 和 $S_{low} = 0.3$ 。

2.3 平抑效果评价指标

为分析储能系统对有功功率波动的平抑效果,本文引用整体功率波动率和局部最大功率变化率来作为评价指标。设整体功率波动率为 F_a ,其表达式如下:

$$F_a = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, σ 为该段时间样本的有功功率标准差; \bar{x} 为该样本的有功功率均值。整体功率波动率 F_a 能客观准确地反映样本片段内有功功率的离散程度,通过比较 F_a 的大小就能掌握样本片段内功率波动的整体情况。

设局部最大功率变化率为 F_b ,其表达式为

$$F_b = \max \left\{ \left| \frac{P'_{g,m} - P'_{g,m+1}}{P'_{g,m+1}} \right| \right\} \quad (14)$$

式中, $P'_{g,m}$ 为储能系统平抑有功功率波动后第 m 个采样点对应的功率值。通过比较 F_b 的大小就能掌握局部的平滑情况。

3 算例分析

3.1 储能系统选址分析

以IEEE-39节点系统为基础模型,通过将原有的部分发电机组替换成额定功率相同的线路换相换流器的高压直流(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)系统,从而构建多馈入直流系统模型,并以此模型来验证本文所提储能选址定容方法对换相失败情况下抑制受端系统有功波动的作用效果,修改后的IEEE-39节点算例拓扑如图1所示。

为便于验证,本文构建的多馈入直流系统模型在选取直流落点时,首先将LCC-HVDC系统代替原IEEE-39节点模型中所有的发电机组,计算其各自的短路比,结果如表1所示。

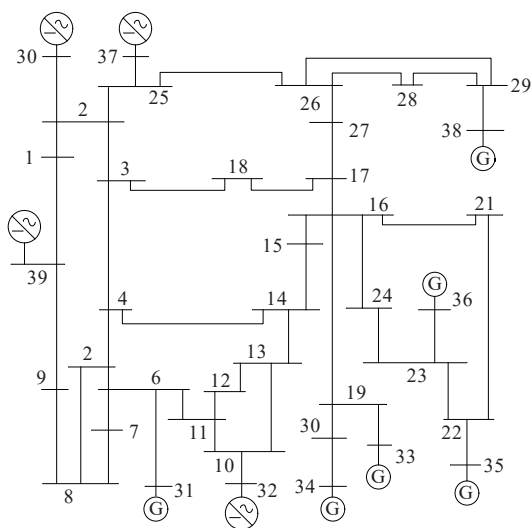


图 1 修改后的 IEEE-39 节点算例拓扑

Figure 1 Modified IEEE-39 node example topology diagram

表 1 各发电机组节点短路比

Table 1 Short-circuit ratio of each generator set node

节点	短路比 SCR	额定功率/MW
30	10.88	250
31	3.24	678
32	3.48	650
33	3.54	632
34	3.61	508
35	3.72	650
36	3.27	560
37	4.22	540
38	1.60	830
39	2.16	1 000

由表 1 可知,38、39 节点的短路比都较小,但由于 38 节点与其他各发电机组节点的电气联系都较弱,不能很好地实现 2 个直流站因一故障发生同时换相失败的效果,所以确定 39 节点为一直流落点。随后通过分析电网结构可知,30、31、32、37 节点与 39 节点所处区域电气联系紧密,能够体现多直流间的交互作用,同时考虑到 31 节点为平衡节点,所以最终将直流落点选为 30、32、37、39 节点,各直流系统额定功率为 250、650、540、1 000 MW。

3.1.1 选址区域的确定

在各点直流换流站分别投切电容,记录其余换流站母线电压的变化情况,根据式(1)计算得到 4 个直流站点间的 MIIF 指标值,结果如表 2 所示。

表 2 各换流站间 MIIF 指标值

Table 2 MIIF index value between converter stations

换流站	不同换流站间 $f_{MIIFSCR,i}$			
	30	32	37	39
30	1.000	0.090	0.274	0.192
32	0.095	1.000	0.048	0.097
37	0.291	0.061	1.000	0.197
39	0.215	0.102	0.206	1.000

由表 2 可知,32 节点处的直流站点与其他 3 个站点之间的 MIIF 指标值均小于 0.1,所以可以将其看作单馈入直流系统;而 30、37、39 节点处直流站点之间的 MIIF 指标值均大于 0.15,存在较强的交互作用,所以选择这 3 个直流落点的换流母线近区范围作为储能系统选址的大致区域。

3.1.2 选址线路的确定

根据式(4)计算 30、37、39 这 3 个直流落点换流母线的 MIESCR 指标值,结果如表 3 所示。据表 3 可知,39 节点处的换流母线 MIESCR 指标值小于 1.6,该回直流系统属于极弱系统,容易因受端交流系统的扰动而发生本地换相失败,为此将该回直流线路及其出线一、二级断面(1、2、8、9 节点)作为储能选址候选站点。

表 3 各换流站 MIESCR 指标值

Table 3 MIESCR index value of each converter station

换流站	$f_{MIESCR,i}$
30	6.74
37	2.86
39	1.12

3.1.3 选址站点的确定

根据式(5)可知,在前面确定的储能选址候选站点的各出线设置单位有功功率波动,计算出这些站点功率变化对系统其余线路的影响,按从大到小进行排序后结果如表 4 所示。

表 4 候选节点 APFRWN 指标值

Table 4 APFRWN index value of candidate nodes

换流站	$f_{APFRWN,i}$
1	0.146 35
2	0.445 15
8	0.672 87
9	0.075 14

由表4可知,2、8节点的 $f_{\text{APFRWN},i}$ 值过大,所以最终选定在这2个节点处安装储能系统,各储能系统的容量设置见下文分析。

3.2 储能系统定容分析

按照文2所提定容方法,经逐一仿真试验发现,在39节点直流系统逆变侧换流母线处设置0.18 s三相金属短路故障时,30、37、39节点直流系统在故障切除后将同时发生换相失败,此时受端交流系统有功功率变化情况如图2所示。根据式(6)~(12),储能系统综合效率 h 取88%,则 $h_d=h_c=93.8\%$,由此计算出节点2、8处储能系统的额定功率和容量分别为2 687 kW和733.78 kW·h。

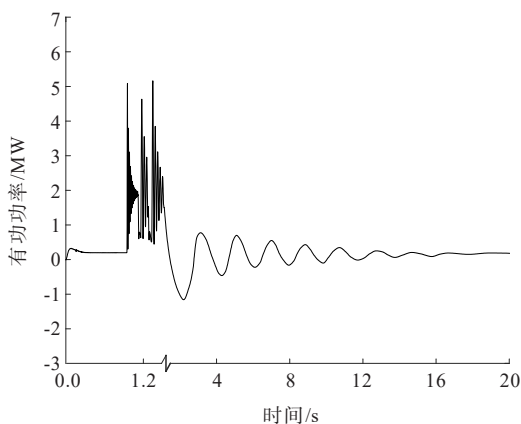


图2 受端交流系统有功功率波动情况

Figure 2 Active power fluctuation of receiving-end AC system

3.3 仿真验证

为验证本文所提储能选址布点方法的正确性和最优性,在文3.1.2选定的储能系统最优选址区域中,在节点1、2、8、9处均设置一个额定功率为2 800 kW,容量为760 kW·h的储能系统,并通过两两组合接入的方式,仿真模拟30、37、39节点直流系统在同时发生换相失败后各种组合方式对受端交流系统有功功率波动的平抑效果。各组合方式下平抑情况如表5所示,节点2、8处投用储能系统后受端交流系统有功功率波动情况如图3所示。

由表5、图3可知,在节点2、8处投入储能系统平抑有功波动后,受端交流系统的整体功率波动率和局部最大功率变化率从35.22%、0.863降低到4.72%、0.054,有效地实现了有功功率波动的平抑,

同时与其他几组储能系统布置情况相比, F_a 、 F_b 的值均为最小,验证了本文所提方法的正确性和最优性。

表5 不同组合方式的仿真结果

Table 5 Simulation results of different combination modes

组合方式	$F_a/\%$	F_b
均不投入	35.22	0.863
节点1、2处投用	26.19	0.377
节点1、8处投用	20.58	0.164
节点1、9处投用	15.73	0.139
节点2、8处投用	4.72	0.054
节点2、9处投用	11.58	0.117
节点8、9处投用	27.39	0.438

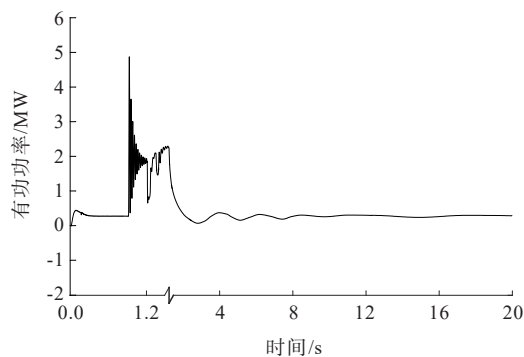


图3 节点2、8处投用储能系统后受端交流系统有功功率波动情况

Figure 3 Active power fluctuation of receiving-end AC system after energy storage system is put into operation at node 2 and 8

4 结语

本文针对多馈入直流系统特点,研究利用储能系统平抑换相失败后受端交流系统的有功功率波动问题,并提出基于MIIF、MEISCR及全网有功功率波动率指标的储能系统选址布点方法。仿真结果表明,按照本文所提方法进行储能系统选址布点,能够有效减少受端交流故障导致直流换相失败带来的功率波动,增强交流系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 程春田,励刚,程雄,等.大规模特高压直流水电消纳问

- 题及应用实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 549-560.
- CHENG Chuntian, LI Gang, CHENG Xiong, et al. Large-scale ultra high voltage direct current hydropower absorption and its experiences[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 549-560.
- [2] 李岩, 滕云, 徐明忻, 等. 特高压交直流混联电网连锁故障安稳风险评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3743-3750.
- LI Yan, TENG Yun, XU Mingxin, et al. Security and stability analysis method for AC/DC UHV power system cascading failure based on improve[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3743-3750.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904+2205.
- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904+2205.
- [4] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 1-10.
- GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.
- [5] 李建林, 王剑波, 葛乐, 等. 电化学储能电站群在特高压交直流混联受端电网应用技术研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 51-61.
- LI Jianlin, WANG Jianbo, GE Le, et al. Review on application technology of electrochemical energy storage power station group in ultra high voltage AC/DC hybrid receiver power grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 51-61.
- [6] 王超, 张红丽, 刘福锁, 等. 新能源集群送出交直流系统多稳定问题演化机理及防控措施[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 77-84.
- WANG Chao, ZHANG Hongli, LIU Fusuo, et al. Evolution mechanism of multiple stability problems and control strategies of AC/DC power system with large-scale wind turbine generators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 77-84.
- [7] 秦骏达, 毕天姝. 故障导致电力系统不可观情况下的故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2017, 11(9): 70-78.
- QIN Junda, BI Tianshu. Fault location method when power system un-observable caused by fault[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9): 70-78.
- [8] 柳飞扬, 曾平, 李征. 电网故障下全功率风电场内部机组的暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 43-54.
- LIU Feiyang, ZENG Ping, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with a full-scale converter under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 43-54.
- [9] 杨裕生. 发展化学储能有助于解决弃风、弃光难题[J]. 电力设备管理, 2020(3): 23-24.
- YANG Yusheng. The development of chemical energy storage can help solve the problems of abandoning wind and light[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(3): 23-24.
- [10] 张嘉诚, 夏向阳, 邓子豪, 等. 储能电站安全参与电网一次调频的优化控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 19-27.
- ZHANG Jiacheng, XIA Xiangyang, DENG Zihao, et al. Optimal control strategy for energy storage power station in primary frequency regulation of power grid[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 19-27.
- [11] 高春辉, 肖冰, 尹宏学, 等. 新能源背景下储能参与火电调峰及配置方式综述[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 38-43.
- GAO Chunhui, XIAO Bing, YIN Hongxue, et al. Energy storage participating in thermal power peaking and configuration in background of new energy: a review[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 38-43.
- [12] 杨军峰, 郑晓雨, 惠东, 等. 储能技术在送端电网中促进新能源消纳的容量需求分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(4): 698-704.
- YANG Junfeng, ZHENG Xiaoyu, HUI Dong, et al. Capacity demand analysis of energy storage in the sending-side of a power grid for accommodating large-scale renewables[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(4): 698-704.
- [13] 付爱慧, 张峰, 张利, 等. 考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 53-61+185.
- FU Aihui, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Capacity optimization strategy of energy storage system for power grid with high penetration of photovoltaic considering limited smoothing of photovoltaic ramping power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 53-61+185.
- [14] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出

- 波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
- WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [15] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等.分布式储能应用模式及优化配置综述[J].电力工程技术,2022,41(2):67-74.
- YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 67-74.
- [16] HOSSEINA M, BATHAEE S M T. Optimal scheduling for distribution network with redox flow battery storage[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 121: 145-151.
- [17] 陶然,张涛,冉华军,等.计及可用输电能力的风电并网系统中STATCOM的双层优化配置[J].智慧电力,2022,50(12):86-93.
- TAO Ran, ZHANG Tao, RAN Huajun, et al. Bi-level optimal configuration of STATCOM in wind power grid-connected system considering available transfer capacity [J]. Smart Power, 2022, 50(12): 86-93.
- [18] ZHONG Q, YU N H, ZHANG X P, et al. Optimal siting & sizing of battery energy storage system in active distribution network[C]// IEEE PES ISGT Europe 2013, Lyngby, Denmark: IEEE, 2013.
- [19] NAYAK R N, SASMAL R P. AC/DC interactions in multi-infeed HVDC scheme: a case study[C]//2006 IEEE Power India Conference, New Delhi, India: IEEE, 2006.
- [20] 张亚迪,陈钊,卢杰.考虑组合间隙与体表场强的特高压直流线路进入等电位路径安全评估研究[J].高压电器,2022,58(10):164-172.
- ZHANG Yadi, CHEN Zhao, LU Jie. Study on safety assessment of entering isopotential path of UHVDC line considering combined clearance and human surface field strength[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 164-172.
- [21] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(1): 378-384.
- [22] AIK D L H, ANDERSSON G, et al. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [23] 高一航,徐晓春,李鹏,等.面向高比例新能源并网的双时间尺度电网电压控制[J].电网与清洁能源,2021,37(5):115-122.
- GAO Yihang, XU Xiaochun, LI Peng, et al. Dual-time-scale grid voltage control for high-proportion new energy grid-connected[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 115-122.