

引用格式:黄弘扬,张震霄,解志良,等.能源汇集系统中多模式接入储能的协调控制及优化设计方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):159-167.

Citation: HUANG Hongyang, ZHANG Zhenxiao, XIE Zhiliang, et al. Coordinated control and optimal design method of multi-mode access energy storage in energy collection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 159-167.

能源汇集系统中多模式接入储能的协调控制及优化设计方法

黄弘扬^{1,4}, 张震霄², 解志良³, 年珩², 吴建勇⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 国网浙江省电力有限公司建设分公司, 浙江 杭州 310000; 4. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司, 浙江 丽水 323000)

摘要:随着能源汇集系统中新能源设备接入比例不断增加,光伏、负荷的不确定性将带来电能质量问题,给电网稳定运行带来挑战,为解决此问题,通过储能接入实现系统电压和功率的补偿控制。首先,分析电网电压与功率之间的耦合影响机理;然后,利用串联型接入储能和并联型接入储能针对电网中的电压波动与功率波动进行协调补偿;最后,基于储能的协调控制对不同接入模式的储能传输容量进行优化设计,满足能源汇集系统补偿需求,保障系统稳定运行。通过仿真算例验证了所提协调控制及优化设计方法的有效性,能够降低储能设计总量,具有实际应用价值。

关键词:电能质量治理;电压补偿;功率补偿;储能并网控制;协调控制;容量优化设计

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.018 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2024)03-0159-09

Coordinated control and optimal design method of multi-mode access energy storage in energy collection system

HUANG Hongyang^{1,4}, ZHANG Zhenxiao², XIE Zhiliang³, NIAN Heng², WU Jianyong⁴

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Construction Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Lishui Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323000, China)

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy devices in the energy collection system, the uncertainty of photovoltaic and load pose power quality issues and challenges to the stable operation of the grid. The voltage and power compensation control of the system can be realized through energy storage access. First, the coupling influence mechanism between voltage and power is analyzed. Then, the series-connected mode and the parallel-connected mode energy storage are used to compensate the fluctuation of grid voltage and power through coordinated control. Finally, based on the coordinated control of energy storage, the capacity of energy storage equipment with different integration modes is optimized to meet the compensation requirements of energy collection system and ensure the stable operation of the system. The effectiveness of the proposed coordinated control and optimization design method is verified by simulation examples, which can reduce the total amount of energy storage and has practical application value.

Key words: power quality management; voltage compensation; power compensation; grid-connected control of energy storage; coordinated control; capacity optimization design

构建以清洁能源为主的新型电力系统是落实国家“碳达峰、碳中和”目标的重要途径^[1-2]。能源

汇集系统可以实现各类能源的级联利用,具有高可再生能源一体化和低碳排放的特点,能够促进可再

收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51977194)

通信作者: 张震霄(1998—),男,硕士研究生,主要从事并网逆变器控制及电能质量治理研究; E-mail: 2990819136@qq.com

生能源消纳和提高能源利用效率^[3-5]。

能源汇集系统集成能源生产、转换、能量存储等功能于一身,包含新能源发电设备、集电系统和储能设备^[6-7]。其中新能源发电设备包括以光伏、风电为代表的可再生能源设备,由于这类可再生能源出力的间歇性、随机性以及负荷终端的多种不确定性,会给配电网带来如电压暂降、谐波等诸多电能质量问题^[8-11]。

近年来,随着储能行业的不断发展,通过储能接入配电网进行电能质量问题治理,实现如电压暂降补偿、功率缺额支撑等功能,对保障配电网稳定运行和提升末端供电质量具有重要意义。有关储能接入配网参与电能质量治理和优化配置的问题已受到学者的广泛关注。储能接入配电网具有多种模式,常规方法是储能升压后直接并联馈入交流网中,进行电流补偿和功率支撑^[12-13];还有通过变压器串联接入的模式,其变压器原边侧串联进配电网线路,通过控制储能逆变器在变压器副边侧的输出调节原边侧在电网线路中的电压输出,外特性表现为“可控电压源”,对配电网电压进行动态灵活补偿^[14]。以并联型储能和串联型储能对应这2种不同接入模式的储能型电能质量治理装置。文献[15]提出了一种具备复合串联型储能与并联型储能的多功能并网变换器拓扑,进一步提高了储能型电能质量治理装置的设备利用率和可靠性。

在储能型电能质量治理装置的控制上,并联型储能采用电流源控制模式,通过功率—电流双闭环控制实现功率指令的跟踪控制^[16-18];有研究将虚拟同步控制技术应用于并联型储能,使其具有主动支撑能力,能够更好地在电网电压、频率变化时起到支撑效果^[19-20]。串联型储能采用电压源控制模式,通过交流坐标系下的直接电压控制能够实现电压暂降和谐波电压的综合治理^[21]。有研究进一步通过并联型储能进行无功补偿,实现对电网电压的调节^[22-25]。文献[26]通过并联型储能的有功、无功功率输出间接发挥电压补偿作用,实现储能协调电压控制和补偿。上述文献仅通过并联型储能控制改进参与协调电压补偿,通过改进串联型储能控制发挥协调功率补偿作用,同样能实现储能变流器的协调控制和功能互补,提升配电网功率控制能力,但现有相关研究较少。

针对上述情况,本文提出串联型储能和并联型储能的协调控制策略,在电压补偿和功率补偿上都

能够实现互补协调;进一步对串联型储能和并联型储能传输容量进行设计,通过综合考虑可再生能源发电和终端负荷波动的影响,提出多模式接入的储能型电能质量治理装置的优化设计方法;仿真验证本文所提控制策略和优化设计方法的有效性,通过串联型储能和并联型储能的协调控制和互补利用,在系统传输容量设计时削减配置总量以节省成本,提升储能系统经济性。

1 能源汇集系统功率—电压波动特性

能源汇集系统中存在光伏、风电、以电力电子设备接入为代表的非线性负荷等包含多种不确定性因素的多能终端。光伏终端的发电量与其所在地域的太阳辐照度正相关,此外其还会受到天气变化的影响,从而使光伏功率波动特性及变化频率发生变化^[27];风电终端功率也具有显著的波动特性,并且存在多重分形特性、间歇性^[28]。因此配电网容易出现输送功率波动现象,在高比例新能源接入的弱交流网条件下,电压与功率产生耦合影响,功率波动若不能得到很好抑制,将会造成电网电压波动以及电压暂升/暂降等问题的出现。

非线性负荷终端的典型代表为经晶闸管或其他不控整流桥接入的时变性负荷,将会在能源汇集系统中引入谐波电流、电压脉动等问题^[29]。针对系统中存在的谐波问题,无源滤波器因其具有经济优越性而被广泛使用,但其补偿能力不可调节且受系统网络阻抗的影响较大。为此,可采用鲁棒性更好且受电网参数影响较小的并联型储能实现系统谐波电流问题的精准治理^[30],配合针对电压补偿接入的串联型储能实现配电网电能质量问题的综合治理。

1.1 多模式接入储能型电能质量治理装置拓扑

图1展示了串联型储能和并联型储能接入电网运行的拓扑结构,左侧为配电网侧,呈现弱交流电网背景下低惯性特征,右侧为多能终端,包含光伏、发电设备以及非线性负荷,模拟考虑新能源出力随机性、波动性和负荷谐波问题的配电网电能质量问题。串联型储能和并联型储能分别接入在网侧与多能终端之间的交流线路实现治理与补偿。

串联型储能运行时可以等效为带阻抗的受控电压源串接在电网线路中,考虑串联型储能接入后的网侧—多能终端之间的功率传输表达式如下:

$$\begin{cases} P_t = \frac{U_g(U_L - U_s)}{Z_g + Z_s} \sin(\varphi_L - \varphi_g) \\ Q_t = \frac{U_g[U_L \cos(\varphi_L - \varphi_g) - U_g]}{Z_g + Z_s} - \frac{U_g U_s}{Z_g + Z_s} \cos(\varphi_L - \varphi_g) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_t 、 Q_t 分别为网侧输送有功、无功功率; U_g 为网侧电压; U_L 为终端负荷电压; U_s 为串联型储能输出电压; φ_L 、 φ_g 分别为网侧和终端侧电压相角; Z_g 为网侧线路阻抗; Z_s 为串联型储能输出阻抗。

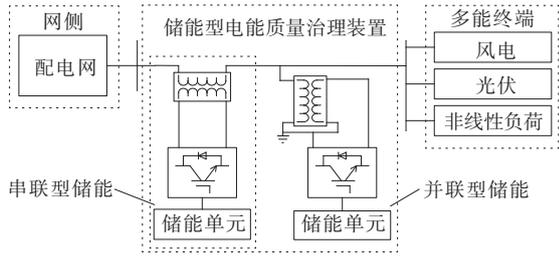


图 1 多模式接入储能型电能质量治理装置拓扑示意图

Figure 1 Topology of power quality control device through multi-mode access with energy storage

并联型储能运行时可以等效为带输出阻抗的受控电流源并联接入,其输出电流可以独立控制并汇入电网线路,实现并联型储能输出有功、无功功率的控制,输出功率的表达式如下:

$$\begin{cases} P_p = \frac{U_L U_p}{Z_g + Z_s} \sin(\varphi_L - \varphi_p) \\ Q_p = \frac{U_L[U_p \cos(\varphi_L - \varphi_p) - U_L]}{Z_p} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_p 、 Q_p 分别为并联型储能输出有功、无功功率; U_p 、 φ_p 分别为并联型储能输出电压和相角; Z_p 为并联型储能输出阻抗。

1.2 配电网功率—电压波动耦合分析

图 2 为考虑储能型电能质量治理装置接入能源汇集系统简化等效电路图。

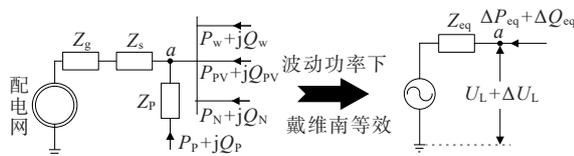


图 2 含串、并联型储能接入的系统简化等效电路图

Figure 2 Equivalent circuit of energy storage access with series mode and parallel mode

图 2 中, P_w 、 Q_w 分别为风电端口的有功、无功量; P_{pV} 、 Q_{pV} 分别为光伏端口的有功、无功量; P_N 、 Q_N

分别为非线性负荷端口的有功、无功量。将并联型储能输出功率与多能终端负荷侧的功率波动作为整体进行考虑,此时系统网侧及串联型储能可以通过戴维南等效为一个单端口网络,简化为一个带等效系统阻抗 Z_{eq} 的理想电压源。而并联型储能与多能终端负荷侧功率的变化量反映在等效输出口 a 处,会产生相应的电压变化量 ΔU_L ,可以表述如下:

$$\Delta U_L = \frac{\Delta Q_{eq} X_{eq} + \Delta P_{eq} R_{eq}}{U_r} \quad (3)$$

式中, X_{eq} 、 R_{eq} 分别为等效系统阻抗 Z_{eq} 的电抗和电阻部分; ΔP_{eq} 、 ΔQ_{eq} 分别为线路整体传输功率变化量的有功、无功分量; U_r 为系统额定电压。

对式(3)作进一步处理,得到:

$$\Delta U_L = -\frac{1}{2} U_L + \sqrt{\Delta Q_{eq} X_{eq} + \Delta P_{eq} R_{eq} + \frac{1}{4} U_L^2} \quad (4)$$

通过式(4)可以得出在图 2 的简化等效电路结构下能源汇集系统配网中功率与电压变化量的耦合影响关系。多能终端侧可再生能源出力波动或负荷功率产生变化会影响配网传输功率,同时会对电网电压产生一定影响,造成电压波动或者暂升、暂降。

2 串、并联型储能协调控制

现有研究中,串联型储能主要针对电压波动、暂升/暂降以及谐波电压问题进行补偿和治理,而并联型储能则主要负责谐波电流治理、系统功率支撑以及潮流优化。

由于弱交流网下电压—功率存在不可忽略的耦合影响,串联型储能和并联型储能同时具备两方面的补偿能力,通过两者的协调控制可以实现能源汇集系统中电压补偿和功率补偿的协调互补,提升系统运行性能。

2.1 串联型储能功率补偿控制

串联型储能可以等效为一个串联接入电网线路中的受控电压源,因此可以通过控制储能逆变器输出侧电压灵活控制加在线路变压器一次侧上的补偿电压,从而对电网中谐波电压、电压波动等问题进行治理和补偿。

在串联型储能功率控制环节中,需要结合串联型储能补偿电压矢量以及电网线路电流矢量来计算其与电网间的功率交互。因此,通过调节串联型储能输出电压的相角和幅值,可以在满足电网电压

额定值的前提条件下实现其向电网输送有功、无功功率的调节与控制,如图3所示。

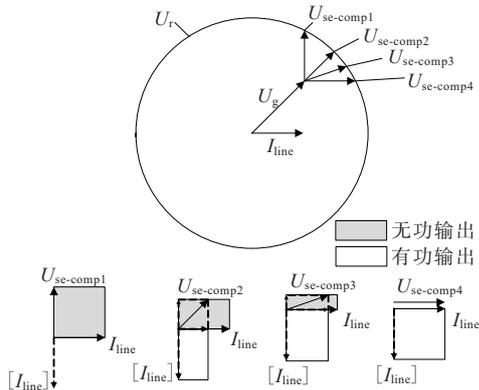


图3 串联型储能有功、无功功率控制示意图

Figure 3 Schematic diagram of active and reactive power control of series mode energy storage

通过 $U_{se-comp1} \sim U_{se-comp4}$ 4种不同的补偿电压均可以实现将电网电压 U_g 补偿至额定电压值 U_r 。控制补偿电压的相角不同,即串联型储能输出电压与线路电流 I_{line} 的夹角不同,可实现输出有功、无功功率的调节。例如, $U_{se-comp1}$ 即通过控制补偿电压相角与线路电流夹角为 90° ,输出均为无功功率,而 $U_{se-comp4}$ 则与电流同相位,输出功率均为有功分量。据此构建串联型储能实现电压补偿与输出功率控制的控制框图如图4所示。

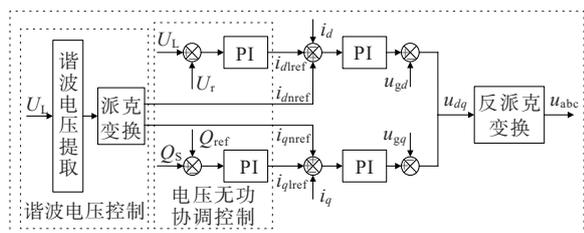


图4 串联型储能电压—功率控制框图

Figure 4 Control block diagram of voltage-power compensation on series mode energy storage

由于在同步旋转坐标系下,只有 d 、 q 2个相互解耦的控制量,而在串联型储能实现电压—功率的协调控制时,存在电压是否保证额定值、有功功率以及无功功率3个待控制量,因此只能选取电压值与无功功率、有功功率中其一作为控制目标(本文串联型储能参与无功功率的协调控制),通过图4所示控制结构实现一定范围内的有功/无功功率协调控制,并同时利用串联型储能特性保证电网电压处于额定值,且波形谐波含量保持较低水平。

2.2 并联型储能电压补偿控制

并联型储能可以等效为一个并联支路的等效电流源,由式(4)可以得出,当并联型储能向电网输出有功、无功功率时,能够通过配网中电压—功率间的耦合影响关系直接对电压产生补偿作用。据此构建并联型储能电压—功率补偿控制。

如图5所示,并联型储能根据所采集得到的串联型储能输出功率 P_s 、 Q_s 通过滞环控制器判断串联型储能是否有能力继续对电网电压进行补偿。若 $\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}$ 小于串联型储能容量,则并联型储能直接响应有功、无功指令值;若 $\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}$ 大于等于串联型储能容量,则使能并联型储能的协调电压控制结合电网电压值 U_L 及线路电流值 I_{line} 进行闭环控制,生成功率环输入的功率指令值 P_{ref} 、 Q_{ref} 。此时,并联型储能输出功率除去式(4)表示的对电压直接产生的影响,还会影响线路电流 I_{line} 。

$$I_{line} = \frac{\sqrt{(S_L \sin \varphi + Q_p)^2 + (S_L \cos \varphi + P_p)^2}}{U_r} \quad (5)$$

而线路电流 I_{line} 又直接影响串联型储能的输出,因串联型储能输出功率为输出电压 U_p 与线路电流 I_{line} 之积。考虑串联型储能容量限制条件下,通过并联型储能输出功率减小 I_{line} 可以协调串联型储能进一步发挥电压补偿作用。

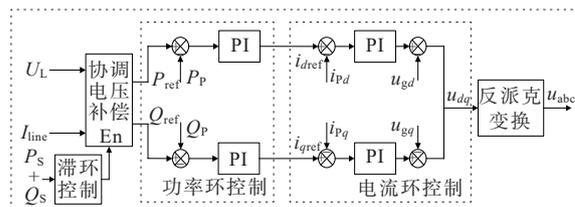


图5 并联型储能电压—功率控制框图

Figure 5 Control block diagram of voltage-power compensation on parallel mode energy storage

3 储能容量优化设计方法

基于串联型储能和并联型储能的协调控制,能够实现储能型电能质量治理装置在能源汇集系统微网中的互补,共同进行电压、电流及功率的多重补偿。在针对相同的补偿需求时,例如30%深度的电压暂降,可以采用串联型储能配合并联型储能空余容量共同进行电压暂降的补偿,从而削减了储能型电能质量治理装置的容量要求。由于配电网中各终端对于电压值合格率的要求相较于功率传输优先级更高,本文提出一种基于电压协调补偿的储

能容量优化设计方法。

3.1 串、并联型储能配置比率分析

由于在能源汇集系统中存在光伏、风电及非线性负荷等多个终端,每个终端的功率波动和变化相互耦合,最终在图2中a点产生的功率变化量是复杂的,其有功、无功功率比率,波动总额都是时变量。

为评价所配置的储能型电能质量治理装置对于电网电压的实时补偿效果,需建立统一的数学模型进行分析。为便于直观地评价配置结果,设定配置串联型储能和并联型储能总量为定值,为2 MW(0.1 p.u.),同时设定配网中波动功率总额一定,为20 MW(1 p.u.),得到如下关系式:

$$\begin{cases} S_{st}(i) = S_s(i) + S_p(i) = \frac{0.1}{100} \times [i + (1 - i)] \\ \Delta S_{eq}(j) = \frac{j}{100} P_{eq} + \sqrt{1 - \left(\frac{j}{100} P_{eq}\right)^2}, \\ i, j = 1, 2, 3, \dots, 99, 100 \\ E(i) = \sum_{j=1}^{100} \min \left\{ \left(\Delta U_L + \frac{S_s(i)}{|I|} \right), 1 \right\} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $S_{st}(i)$ 为一组相同配置总量,不同串、并联型储能配置比率的储能型电能质量治理装置配置方案, $S_s(i)$ 和 $S_p(i)$ 分别为对应第 i 组配置下串联型储能和并联型储能的配置容量; $\Delta S_{eq}(j)$ 为一组相同波动功率总额,不同功率因数条件下的配电网等效传输功率变化量; $E(i)$ 为一组相同配置总量,不同串、并联型储能比率的储能型电能质量治理装置配置下的电压补偿能力评价结果; ΔU_L 为根据式(4)计算得到的负荷端电压变化量; I 为根据式(5)计算得到的线路电流值。

得到 $E(i)$ 后,通过分析比较储能型电能质量治理装置总容量保持不变时,不同串、并联型储能配置比率条件下的系统综合电压补偿能力,得出在该工作条件下的最优串、并联型储能配置比率。

3.2 储能型电能质量治理装置总量优化设计

由式(4)可以得出,当并联型储能向电网输出有功、无功功率时,能够通过配网中电压—功率间的耦合影响关系直接对电压产生补偿作用。据此构建并联型储能电压—功率补偿控制。

进一步寻找该配置条件下,储能型电能质量治理装置进行电压补偿时的工作薄弱点,即面对何种情况下的波动功率,其电压补偿效果最差,通过定义电压补偿度 $D(j)$ 来量化储能型电能质量治理装置在应对不同波动功率工况下的电压补偿效果,储

能配置总量仍取2 MW(0.1 p.u.),串、并联型储能配置比率按照前述最优进行取值,波动功率工况设置参照式(6),具体计算如下:

$$\begin{cases} \Delta S_{eq}(j) = \frac{j}{100} P_{eq} + \sqrt{1 - \left(\frac{j}{100} P_{eq}\right)^2}, \\ j = 1, 2, 3, \dots, 99, 100 \\ D(j) = \sum_{j=1}^{100} \min \left[\left(\frac{\Delta U_L + S_s/I}{1 - U^*} \right), 1 \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中, U^* 为不考虑储能接入参与电网电压治理情况下,通过式(4)计算得到的电网电压变化量。

通过式(7)可以计算得到在该最优储能配置下,采用何种功率因数的波动功率,储能电压补偿效果最差。因此需按照在该工况下能够将电网电压补偿至额定值 U_r 的条件来设计储能配置方案。根据波动功率峰值与该工况下波动功率功率因数,便可最终确定优化后的串、并联型储能的配置比率与配置总量,从而以更低的储能配置总容量实现相同场景下能源汇集系统中配网波动功率平抑与电网电压补偿。

4 仿真验证

为验证本文所提储能协调控制和优化设计方法的有效性,通过 MATLAB/Simulink 建立能源汇集系统中配电网功率—电压协调补偿模型,展开仿真验证工作,仿真模型中参数设置如表1所示。

表1 系统参数表

Table 1 System parameters

参数名称	单位	参数值
额定电压 U_r	kV	8.165
额定功率基值 P_{nom}	MW	20
光伏额定输出功率 P_{pv}	p.u.	1
风电额定输出功率 P_w	p.u.	0.5
非线性负荷额定值 P_N	p.u.	0.2
交流网同步机惯量	J/kg · m ²	5 000
交流网同步机阻尼系数 K_d		150
配电网线路电阻 R_g	Ω	$[2.3, 2.8, 1.8] \times 10^{-2}$
配电网线路电抗 X_g	Ω	$[8.2, 7.2, 9.2] \times 10^{-2}$
串联型储能电压控制环		$k_p=1, k_i=2$
串联型储能无功功率协调控制环		$k_p=7.5, k_i=12.5$
串联型储能电流控制环		$k_p=5, k_i=20$
并联型储能协调电压补偿控制环		$k_p=1, k_i=30$
并联型储能功率控制环		$k_p=1, k_i=40$
并联型储能电流控制环		$k_p=5, k_i=20$

图6展示了储能电能质量治理装置电压—功率协调控制的仿真结果。

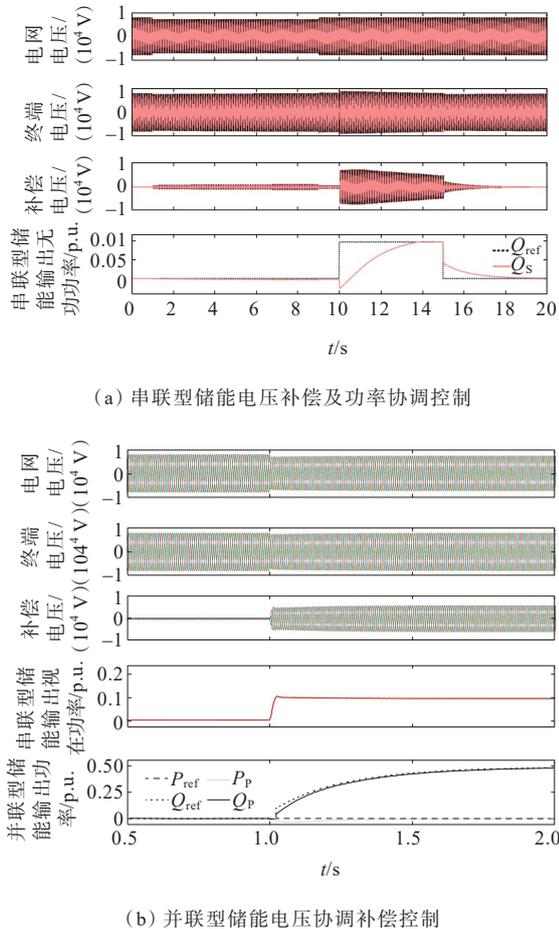


图6 储能电压—功率协调控制仿真结果

Figure 6 Simulation results of the coordinated voltage-power control with energy storage

由图6(a)可得,在1~10 s内电网电压发生暂降,跌落深度为10%额定电压,串联型储能通过控制保持负荷端电压为额定值,实现电压补偿功能。 $t=10$ s时,电网电压跌落恢复,同时给出阶跃无功指令,利用串联型储能对输出补偿电压相角和幅值的调节,可以在保证负荷端电压仍为额定值的前提下兼顾无功功率指令的响应从而实现无功补偿。由图6(b)可得, $t=1$ s时电网电压发生跌落深度为20%额定电压的暂降,串联型储能随机开始进行电压补偿,并在短时期内达到其传输容量限制,串联型储能输出视在功率不再变化,但此时负荷端电压仍未补偿恢复至额定值。此时,并联型储能进行电压协调控制,并联型储能输出无功功率不断增加直至补偿终端电压恢复至额定值。仿真结果验证了本文所提的串、并联型储能协调控制策略,令串联型储能除自身常规实现的电压补偿功能外,还附带实

现无功补偿功能,从而在并联型储能重载时,分担并联型储能的功率调节压力;而并联型储能在仅串联型储能受制于传输容量限制无法完成补偿的情况下,能分担串联型储能的电压补偿压力,保证了负荷终端电压的稳定。

基于储能的协调控制,进一步对储能进行容量优化设计,通过式(6)分析计算得到3种电网工况中不同储能配置比率下的系统电压补偿能力评价结果如图7所示,按照表1中配电网线路电阻和电抗依次取值,分别代表不同 R/X 值的电网工况1、2、3。

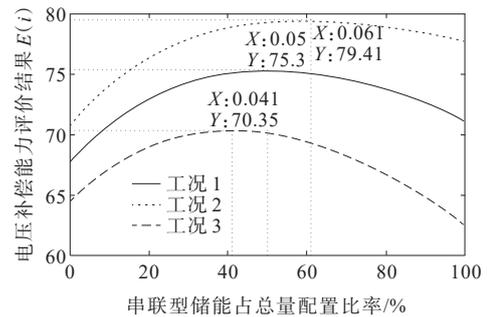


图7 最优配置比率分析结果

Figure 7 Analysis results of optimal configuration ratio

由图7可知,工况1中50%、50%的串、并联型储能配置比率的电压补偿效果评价最高;工况2中61%、39%的串、并联型储能配置比率具有最高的电压补偿效果评价;工况3中分析得出的最优串、并联型储能配置比率为41%、59%。此外,对比3种工况的电压补偿能力评价结果可知,电网阻抗中电抗越高越不利于储能进行配网电压补偿。

针对以上3种工况的储能配置比率分析结果,进一步对储能配置总量进行设计,通过式(7)分析计算可知在该配置比率下,储能应对0.8 p.u.波动功率值不同功率因数工况下,进行电压波动补偿的分析结果如图8所示。

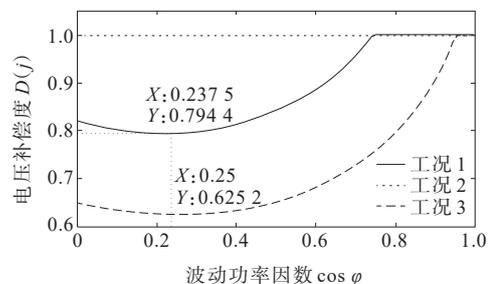


图8 储能工作薄弱点分析结果

Figure 8 Analysis results of weak points in energy storage operation

由图8可知,工况2中,由于所选取串、并联型储能总量基值为0.1 p.u.,在该配置下已经能够实现全功率因数的波动功率工况电压补偿。而在工况1中波动功率的功率因数 $\cos \varphi$ 为0.237 5以及工况3中波动功率的功率因数 $\cos \varphi$ 为0.25的2种情况,利用储能进行电压波动补偿的效果最不理想(设此时补偿度为 D_{\min})。储能配置方案设计需考虑可能出现的最大波动功率总量,并确保储能型电能质量补偿装置在任何等于或小于该波动功率总量的波动工况下均能够实现终端电压波动的全额补偿额定值。

对于工况1、3,根据式(8)可以计算得到储能设计总量 S_{sum} 。而对于工况2,需调低串、并联型储能设计总量预设值,再重新分析计算该工况下储能进行电压补偿的工作薄弱点,用于指导储能优化设计总量的求取。

$$S_{\text{sum}} = 0.1 \times \frac{1}{D_{\min}} \quad (8)$$

综上,通过串、并联型储能的协调控制实现了能源汇集系统中配电网电压—功率的互补,并基于该电压互补特性进一步对3组不同 R/X 值工况下的配电网中储能配置总量进行优化设计。将得到的优化后储能配置总量与不采用协调控制,利用串、并联型储能分别满足电压、功率补偿需求后的优化前配置储能配置总量进行对比,结果如表2所示。

表2 优化设计前后配置结果

Table 2 Configuration results before and after optimization design

工况	优化前总量/p.u.	优化后总量/p.u.	容量节省/%
1	0.153 3	0.127 6	20.14
2	0.109 2	0.095 4	14.47
3	0.199 6	0.159 9	24.83

优化后的储能配置方案在满足相同电压补偿需求下能够节省储能配置容量,且相对于不采用协调控制的配电网储能变流器,利用串联型储能的功能互补特性,具有更强的功率调节和支撑能力,验证了本文所提多模式接入储能协调控制方法与优化设计方法的有效性。

5 结语

本文通过储能的多模式接入对能源汇集系统中配电网的电能质量进行治理,其创新性主要体现在以下2个方面。

1) 串、并联型储能的双向协调控制。利用不同模式接入的储能特性并加以控制,令并联型储能能够通过功率输出参与电压补偿的同时,串联型储能能够通过输出电压相角和幅值的调整参与功率补偿,实现串、并联型储能电压、功率补偿功能的双向互补利用,分担了各自储能单元的补偿压力。

2) 储能型电能质量治理装置配置总容量的优化设计。基于不同模式接入的储能在电压补偿上的互补特性,在满足相同工况配网的补偿需求条件下,通过求解串、并联型储能容量最优配置比率,进而分析该配置下储能进行电压补偿的工作薄弱点,最终得到针对电网参数及功率波动特征的最优及最经济储能型电能质量治理装置配置方案。

参考文献:

- [1] 林峰,肖立华,商浩亮,等.“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统的设计及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(1):29-34.
LIN Feng, XIAO Lihua, SHANG Haoliang, et al. Design and application of energy Internet digital twin system under the background of “dual carbon” [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 29-34.
- [2] 王林钰,张富强,龚一莼,等. 中国跨能源品种可调节资源潜力与开发利用情景[J]. 中国电力, 2023,56(6):1-10.
WANG Linyu, ZHANG Fuqiang, GONG Yichun, et al. Potential and utilization scenarios for regulation resources across energy varieties in China [J]. Electric Power, 2023, 56(6): 1-10.
- [3] YANG Y, LUO Z, YUAN X Y, et al. Bi-level multi-objective optimal design of integrated energy system under low-carbon background [J]. IEEE Access, 2021, 9: 53401-53407.
- [4] 张文伟,王维庆,樊小朝,等. 利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(5):70-83.
ZHANG Wenwei, WANG Weiqing, FAN Xiaochao, et al. Optimal capacity configuration of a low carbon energy system of oxygen-enriched coal-fired power plant using wind power to produce oxygen [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 70-83.
- [5] 胡俊杰,童宇轩,刘雪涛,等. 计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略[J]. 电工技术学报, 2024,39(5):1419-1435.
HU Junjie, TONG Yuxuan, LIU Xuetao, et al. Multi-time-scale robust optimization strategy for integrated energy system considering the refinement of hydrogen energy

- use[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024,39(5):1419-1435.
- [6] 陈娟,黄元生,鲁斌. 区域能源互联网“站一网”布局优化研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):675-684.
CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Research on “stations-pipelines” layout and optimization of regional energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 675-684.
- [7] SHAO C C, SHAHIDEHPOUR M, WANG X F, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4418-4429.
- [8] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [9] 刘金昌,王久和,陈东雪. 有源电力滤波器滑模—无源控制策略研究[J]. 发电技术,2023,44(2):280-286.
LIU Jinchang, WANG Jiuhe, CHEN Dongxue. Research on sliding mode and passivity based control strategy of active power filter[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 280-286.
- [10] 徐岸非,黄晴宇,沈磊,等. 局部电网三相不平衡畸变电流补偿方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(10):17-27.
XU Anfei, HUANG Qingyu, SHEN Lei, et al. A three-phase unbalanced distortion current compensation method for local power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 17-27.
- [11] 朱明星,卢轩,张华赢,等. 无储能动态电压恢复器安全运行区域[J]. 中国电力,2022,55(8):157-164.
ZHU Mingxing, LU Xuan, ZHANG Huaying, et al. Safe operation area of energy-storage-free dynamic voltage restorer[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 157-164.
- [12] 曹善康,魏繁荣,林湘宁,等. 网侧电压跌落下计及无功支撑效能的直流微电网多目标优化策略[J]. 中国电机工程学报,2023,43(15):5759-5772.
CAO Shankang, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimization strategy of DC microgrid based on reactive power support efficiency during voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5759-5772.
- [13] 徐群伟,钟晓剑,胡健,等. 基于误差迭代PI和改进重复控制的APF补偿电流控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):124-131.
XU Qunwei, ZHONG Xiaojian, HU Jian, et al. Compensation current control of APF based on error iteration PI and improved repetitive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 124-131.
- [14] 刘广艳,何春. 简述动态电压恢复器(DVR)在配电网中的应用[J]. 电气时代,2022(5):51-55.
LIU Guangyan, HE Chun. The application of dynamic voltage restorer (DVR) in distribution network is briefly described[J]. Electric Age, 2022(5): 51-55.
- [15] 贾文慧,郭祺,涂春鸣,等. 集成电压补偿与无功支撑能力的并网变换器拓扑优化及控制[J]. 电力系统自动化, 2023,47(1):153-161.
JIA Wenhui, GUO Qi, TU Chunming, et al. Topology optimization and control of grid-connected converter with integrated voltage compensation and reactive power support capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 153-161.
- [16] 陈仲伟,李达伟,邹旭东,等. 双馈电机驱动的飞轮储能系统稳定运行控制方法[J]. 电力科学与技术学报,2021, 36(1):177-184.
CHEN Zhongwei, LI Dawei, ZOU Xudong, et al. Research on stable operation control method of flywheel energy storage system driven by doubly fed machine[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 177-184.
- [17] 苏大威,徐伟,张琦兵,等. 基于阻抗分析法的风储并网系统谐波稳定性分析[J]. 智慧电力,2022,50(6):64-71.
SU Dawei, XU Wei, ZHANG Qibing, et al. Harmonic stability analysis of wind-storage grid-connected system based on impedance analysis method[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 64-71.
- [18] 张旭,查效兵,岳帅. 基于转子动能控制的DFIG调频能力分析与调频方案[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3):141-147.
ZHANG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai. Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly-fed induction generator based on the rotor kinetic energy control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 141-147.
- [19] 王浩,郝正航,陈卓,等. 基于虚拟同步发电机的储能逆变器控制策略及无缝切换技术[J]. 科学技术与工程, 2022,22(9):3594-3600.
WANG Hao, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Control strategy and seamless switching technology of energy storage inverter based on virtual synchronous generator [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3594-3600.
- [20] 王逸超,李湘旗,陈仲伟,等. 一种光储独立并网式虚拟同步发电机控制方法[J]. 太阳能学报,2022,43(1):249-255.
WANG Yichao, LI Xiangqi, CHEN Zhongwei, et al.

- Avirtualsynchronous generator controlmethod based on independent grid-connected structure of photovoltaic system and energy storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2022,43(1):249-255.
- [21] 张震霄,赵建勇,年珩,等.基于电力电子调压器的电网综合治理控制策略[J].电气传动,2022,52(4):49-55.
ZHANG Zhenxiao, ZHAO Jianyong, NIAN Heng, et al. Control strategy of integrated power grid management based on power electronic voltage regulator[J]. Electric Drive,2022,52(4):49-55.
- [22] 黄际元,黄珂琪,杨俊,等.储能参与电网调压与动态无功支撑的协调控制策略[J].电器与能效管理技术,2020(10):77-83+89.
HUANG Jiyuan, HUANG Keqi, YANG Jun, et al. Coordination control strategy of energy storage participating in grid voltage regulation and dynamic reactive power support[J]. Electrical & Energy Management Technology,2020(10):77-83+89.
- [23] 杨梦宁,赵艳雷,王蕾,等.基于无差调压U-I下垂的同步定频微网控制策略研究[J].现代电子技术,2021,44(21):144-148.
YANG Mengning, ZHAO Yanlei, WANG Lei, et al. Research on synchronous fixed-frequency microgrid control strategy based on zero-error voltage regulating U-I drooping[J]. Modern Electronics Technique,2021,44(21):144-148.
- [24] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等.基于储能型APF的微电网电能质量综合治理[J].高压电器,2022,58(8):238-244+251.
YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on APF with energy storage[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(8):238-244+251.
- [25] 罗朝旭,刘洋,罗钦,等.基于动态下垂系数的低压微电网无功控制策略[J].电力建设,2022,43(1):78-86.
LUO Zhaoxu, LIU Yang, LUO Qin, et al. Reactive power control strategy of low-voltage microgrid applying dynamic droop coefficient[J]. Electric Power Construction,2022,43(1):78-86.
- [26] 张震霄,年珩,李培,等.储能型统一电能质量调节器电压补偿能力分析及其提升方法[J].电力系统自动化,2022,46(23):151-159.
ZHANG Zhenxiao, NIAN Heng, LI Pei, et al. Voltage compensation capability analysis and improvement method for unified power quality conditioner with energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(23):151-159.
- [27] 管霖,赵琦,周保荣,等.基于多尺度聚类分析的光伏功率特性建模及预测应用[J].电力系统自动化,2018,42(15):24-30.
GUAN Lin, ZHAO Qi, ZHOU Baorong, et al. Multi-scale clustering analysis based modeling of photovoltaic power characteristics and its application in prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15):24-30.
- [28] 谷晓君,梁钊,杨昊泽.基于风电场运行数据的风电功率波动特性研究[J].风机技术,2022,64(3):52-56.
GU Xiaojun, LIANG Zhao, YANG Haoze. Study of the wind power's fluctuation characteristics based on the operation data of wind farm[J]. Chinese Journal of Turbomachinery,2022,64(3):52-56.
- [29] YU Z W, SUN D, NIAN H, et al. Power quality control of renewable energy system for hydrogen production based on virtual impedance[C]//2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Gyeongju, Korea, IEEE, 2021:303-308.
- [30] 陈强伟,蔡文皓,牛春光,等.基于VMD的APF谐波检测算法[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):120-124.
CHEN Qiangwei, CAI Wenhao, NIU Chunguang, et al. A APF harmonics detection method based on VMD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):120-124