

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221158

# 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践

王新宝, 葛景, 韩连山, 俞秋阳, 高玉喜, 刘子俊

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 构网型储能因具备类似常规发电机控制响应特性而受到广泛关注, 被视为支撑新型电力系统建设的关键装备。目前针对该技术研究大多针对微电网应用场景, 尚无大电网应用层面的系统级研究。基于该情况, 首先在构网型控制技术原理的基础上提出构网型储能建模方法。并结合构网型储能电压源的本质属性, 推导其接入系统后参与系统功率分配机制, 探讨其在电网装机占比问题。最后, 以国内某工程为案例, 开展构网型储能模型搭建及在大电网应用场景下的仿真分析。结果表明, 所提的建模和分析方法能够指导构网型储能的系统级工程应用。  
**关键词:** 新型电力系统; 构网型; 储能; 电压源; 储能规划

## Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system

WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, YU Qiuyang, GAO Yuxi, LIU Zijun  
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Grid-forming BESS has gained a lot of attention because of its control response characteristics being similar to conventional generators, and is regarded as the key equipment to support the construction of new type of power system. Most research on this technology is currently focused on micro grid application scenarios, and there is no system level research on large grid application. Given this, a modeling method of grid-forming BESS is proposed based on the principle of grid-forming technology. Then the mechanism of grid-forming BESS participating in power sharing is deduced based on the essential properties of voltage source, and the capacity for its proportion in the power grid is discussed. Finally, taking a domestic project as an example, a grid-forming BESS model is built and then simulation analysis is made for a large power grid application scenario. The results show that the modeling and analysis methods proposed in this paper can guide the system level engineering application of grid-forming BESS.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2400805).

**Key words:** new type power system; grid-forming; BESS; voltage source; BESS planning

## 0 引言

截至 2022 年 3 月底, 我国风电、光伏装机分别达 3.37 亿 kW、3.18 亿 kW, 稳居世界首位<sup>[1]</sup>, 且由于风光资源与负荷需求的逆向分布, 目前我国北方新能源富集地区的清洁能源主要依托跨区直流输送至中东部负荷中心<sup>[2]</sup>。随着“十四五”期间新能源开发规模持续增加, 电力系统“双高”特性将更加凸显。高比例新能源带来的影响主要集中在两个方面<sup>[3]</sup>: 1) 风光资源的不确定性加大了中长时间尺度的电力、电量平衡难度; 2) 电力电子设备占比不断

提高而其设计裕度低、支撑特性弱, 导致电网安全稳定水平下降。

当前对解决高比例新能源接入和消纳问题的研究和实践主要集中在新能源快速调频、调压<sup>[4]</sup>以及风机系统惯量响应<sup>[5]</sup>等方面。文献[4]提出利用光伏功率快速响应特性参与电网功率及频率调节的方法, 并在国内进行了工程应用。文献[5]首次对风电场惯量响应提出明确要求。但上述研究均基于常规跟网型控制技术方案, 仍存在电流源控制特性所固有的锁相稳定性等问题, 导致其难以满足新型电力系统发展需求<sup>[6-8]</sup>。

构网型技术最初的研究场景主要集中在微电网领域<sup>[9]</sup>, 其技术路线主要包括下垂控制、虚拟同步控制、匹配控制、虚拟振荡器控制等<sup>[10-15]</sup>。其中虚

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400805); 南瑞集团有限公司项目资助(JS2001741)

拟同步控制为当前主流技术路线。进一步, 文献[16]基于几何方法分析了构网型变换器的小信号同步稳定性并推导其稳定范围。文献[17]通过模型预测控制实现了储能系统转动惯量的提升。而在工程实践方面, 目前主要包括英国 3×23 MW 构网型风电场项目<sup>[18]</sup>、南澳 30 MW 构网型储能项目<sup>[19]</sup>等。相较于风电、光伏, 储能由于能量来源独立, 可作为构网型技术的理想载体, 且其硬件形态上与常规储能基本相同。构网型储能与常规储能的差异主要在于构网型控制策略对于电力电子器件过流能力、设备散热性能等的要求更高, 以更好地发挥电压源支撑作用。

构网型储能在理论上可有效改善高比例新能源电网存在的短路容量、转动惯量缺失等问题, 但当前针对构网型储能的研究多以单机或标准算例系统为对象开展机理分析和功能验证工作, 对于其接入实际电网的规划研究和应用尚缺乏深入思考。在工程应用方面, 目前构网型储能尚处于起步阶段且大多集中于微电网场景。因此, 结合新型电力系统建设需要, 亟需对构网型储能应用于大电网工况下的功率分配和在未来电网中装机占比等问题开展深入探讨。

为此, 本文开展了构网型储能建模方法分析, 并在此基础上开展了构网型储能接入系统后的功率分配机制研究, 探讨了其在电网中装机占比问题。基于国内某工程案例, 进行了构网型储能建模及大电网应用仿真分析, 并对未来构网型储能技术发展提出建议。

## 1 构网型储能技术原理

### 1.1 储能技术

根据技术原理差异, 储能技术主要划分为物理储能、电磁储能和电化学储能<sup>[20]</sup>。所研究的构网型储能指的是采用电压源型换流器的电化学储能。

如图 1 所示, 储能系统主要由电池系统、变流器及其控制系统、升压变等部分组成。其中, 电池系统、变流器是实现其控制功能的核心设备。

由于兼具功率灵活控制、能量储存功能, 储能系统在参与电网电力电量平衡方面具备显著优势, 其应用范围包括电网侧、电源侧、负荷侧、微电网侧, 应用功能包括平抑新能源波动、参与系统调峰、负荷侧削峰填谷、辅助电厂调频等。为了将波动性、间歇性特征明显的新能源转化为友好型电源, 国内多个省份陆续出台政策文件, 要求新能源发电项目配套建设电化学储能, 其配置比例范围为新能源装机容量容量的 10%~20%, 备电时长在 1~4 h 内<sup>[21]</sup>。

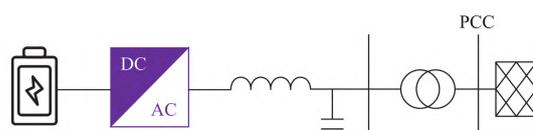


图 1 储能系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of BESS

### 1.2 构网型储能原理与建模方法

构网型储能通过控制内电势的相位与幅值实现输出功率灵活调整, 呈电压源特性。其输出有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  的表达式分别如式(1)、式(2)所示。

$$P = \frac{E^2}{Z} \cos \theta - \frac{EU}{Z} \cos(\theta - \phi) \quad (1)$$

$$Q = \frac{E^2}{Z} \sin \theta - \frac{EU}{Z} \sin(\theta - \phi) \quad (2)$$

式中:  $E$ 、 $U$  分别为构网型储能虚拟内电势、外电网电压;  $\phi$  为构网型储能与外电网相角差;  $Z$ 、 $\theta$  分别为构网型储能与同步发电机间联络阻抗的幅值与角度。

现有主流大电网规划仿真软件均采用机电暂态技术路线。因此, 为了实现系统级应用, 首先需要开发满足大电网仿真需求的构网型储能机电暂态仿真模型。

根据前文分析, 构网型储能由虚拟功角  $\theta$  和内电势  $E$  的控制组成, 分别对应有功类、无功类控制。有功类控制的主要功能为模拟转动惯量支撑特性, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D\Delta\omega \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $T_J$  为虚拟惯性时间常数;  $D$  为阻尼系数;  $P_m$ 、 $P_e$  分别为虚拟机械功率、电磁功率;  $\omega$ 、 $\omega_0$ 、 $\Delta\omega$  分别为系统频率、额定频率和频率偏差。

为了实现多电压源并列运行, 构网型储能需通过有功-频率下垂机制实现功率分配, 其原理与常规机组调速器类似, 表达式如式(4)所示。

$$\Delta P_{\text{ref}} = \begin{cases} K(\Delta f + f_{\text{db}}) & \Delta f < -f_{\text{db}} \\ 0 & -f_{\text{db}} \leq \Delta f \leq f_{\text{db}} \\ K(\Delta f - f_{\text{db}}) & \Delta f > f_{\text{db}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta P_{\text{ref}}$  为一次调频功率;  $f_{\text{db}}$ 、 $\Delta f$  分别为调频死区、频率偏差量;  $K$  为调频系数。

对于无功类控制, 借鉴常规发电机积分型励磁控制原理, 本文采用基于电压直接反馈的快速调压控制策略, 其内电势  $E$  如式(5)所示。

$$\begin{cases} E = E_{set} + (V_{ref} - V) \left( K_a + \frac{1}{sT_a} \right) \\ V_{ref} = V_{set} + K_q (Q_{ref} - Q_e) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $K_a$ 、 $T_a$  分别为调压比例系数、时间常数； $E_{set}$ 、 $V_{ref}$ 、 $V_{set}$ 、 $V$  分别为内电势基准值、端母线的目标

控制电压、电压基准值、实测电压； $Q_{ref}$ 、 $Q_e$  分别为无功功率参考值、实测值； $K_q$  为无功-电压下垂控制系数。

结合式(3)—式(5)，建立构网型储能控制模型，如图 2 所示。

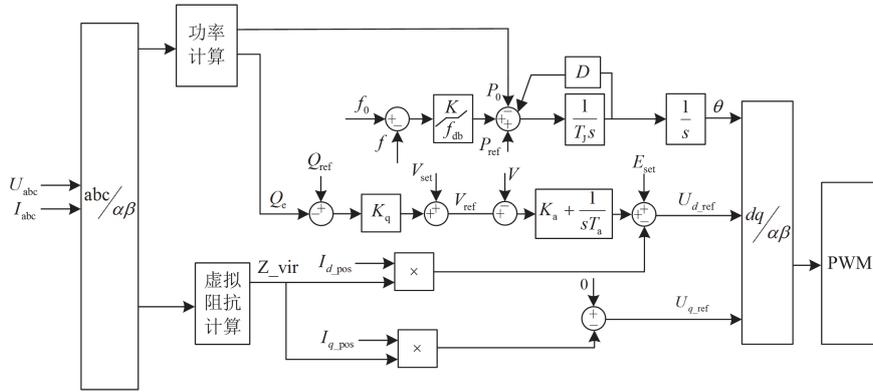


图 2 构网型储能机电暂态模型

Fig. 2 RMS model for grid-forming BESS

### 1.3 构网型储能在新型电力系统中定位

当前电源侧风光配储、电网侧集中式储能等应用场景中，储能仅发挥支撑性作用，主要包括平抑新能源功率波动、削峰填谷、一次调频等，其本质仍然是采用电流源控制的跟网型储能，依赖交流电网为其提供电压源支撑作用。而对于构网型储能，“电压源控制+功率同步控制”是其最本质特征，可为交流电网提供电压源支撑作用。对于构网型储能在新型电力系统中的定位，需围绕电网不同发展阶段的需求，抓住不同阶段的“主要问题”。

围绕“碳达峰、碳中和”的目标，以 2030 年为时间节点，可将新型电力系统发展划分碳达峰期、碳中和期<sup>[22]</sup>。

碳达峰期的主要特点为：电源侧逐步形成以新能源装机为主体的格局、交流主网整体仍维持较高转动惯量和交流同步稳定运行能力。构网型储能在该阶段应充分发挥新型电力系统“调和”作用，重点解决高比例新能源电网存在的网、源、荷等多类元素的协调问题，如转动惯量不足导致频率变化快、暂态频率偏差大、新能源多场站短路比不足导致电压支撑能力弱和阻抗特性差导致宽频振荡风险增加等。上述问题不是该阶段大电网的普遍问题，但由于其特殊性及其常规解决方案的局限性，需要构网型储能发挥调和电源的作用。

碳中和期的主要特点为：电源侧形成以新能源电力电量为主体的格局，电网侧交直流混联电网、微

电网等多形态并存。该阶段的主要问题为电压源占比显著降低导致电网稳定水平下降。构网型储能需要发挥类似常规同步机组的电压源支撑作用，提升稳定水平。当前已投运的部分离网型微电网中的构网型储能即承担该类作用，采用“电流源控制的新能源+电压源控制的构网型储能”的配置方案，实现微电网 100% 新能源孤岛运行。与微电网应用场景不同，构网型储能在大电网的应用重点，考虑了其与传统机组间的暂态功率共享机制及其装机占比问题。

## 2 关键技术

### 2.1 与同步发电机组暂态功率共享机制

常规同步发电机组在系统发生有功功率阶跃情况下的功率分配可分为 3 个阶段<sup>[23-24]</sup>。其中，第一个阶段为瞬时功率响应，其本质是同步机功角不能突变。构网型储能同样具备该特性，以图 3 为例，可推导出二者在第一个阶段的功率分配表达式。

对于上述网络，各节点复功率矩阵表达式为

$$\hat{S} = \hat{V}\hat{I} = \hat{V}\hat{Y}\hat{V} \quad (6)$$

式中： $\hat{V}$  为节点电压矢量； $\hat{I}$  为节点注入电流矢量； $\hat{Y}$  为  $N \times N$  ( $N$  为节点数量) 阶节点导纳矩阵； $\hat{V}$  为节点电压的共轭组成的对角线矩阵； $\hat{S}$  为各节点注入复功率的共轭。

节点电压采用极坐标形式  $\hat{V}_i = V_i \angle \theta$ ，代入式 (6)，可得节点  $i$  有功、无功功率，如式(7)所示。

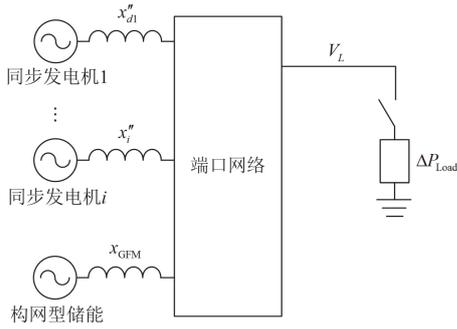


图3 构网型储能、同步发电机接入系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of grid-forming BESS and synchronous generator access system

$$\begin{cases} P_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i, L}^n E_i E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + \\ V_L E_i (G_{iL} \cos \delta_{iL} + B_{iL} \sin \delta_{iL}) \\ Q_i = -E_i^2 B_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i, L}^n E_i E_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + \\ V_L E_i (G_{iL} \sin \delta_{iL} - B_{iL} \cos \delta_{iL}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $E_i$ 、 $E_j$  分别为电源节点  $i$ 、 $j$  内电势;  $V_L$  为负荷节点电压幅值;  $n$  为电源节点数量;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  的有功功率、无功功率;  $G_{ii}$ 、 $G_{ij}$ 、 $G_{iL}$  分别为节点  $i$  的自电导、节点  $i$  与节点  $j$  间、节点  $i$  与节点  $L$  间互电导;  $\delta_{ij}$ 、 $\delta_{iL}$  分别为节点  $i$  与节点  $j$ 、节点  $i$  与节点  $L$  间角度差;  $B_{ii}$ 、 $B_{ij}$ 、 $B_{iL}$  分别为节点  $i$  的自电纳、节点  $i$  和节点  $j$ 、节点  $i$  和节点  $L$  间互电纳。

若忽略网络中电导, 则进一步简化为

$$\begin{cases} P_i \approx \sum_{j=1, j \neq i, L}^n E_i E_j B_{ij} \sin \delta_{ij} + V_L E_i B_{iL} \sin \delta_{iL} \\ Q_i \approx -E_i^2 B_{ii} - \sum_{j=1, j \neq i, L}^n E_i E_j B_{ij} \cos \delta_{ij} - V_L E_i B_{iL} \cos \delta_{iL} \end{cases} \quad (8)$$

不同类型电源在发生  $\Delta P_{\text{Load}}$  的有功功率扰动后, 节点  $i$  有功出力变化量  $\Delta P_i$  线性化表达式为

$$\Delta P_i = \sum_{j=1, j \neq i, L}^n (E_i E_j B_{ij} \cos \delta_{ij0}) \Delta \delta_{ij} + (V_L E_i B_{iL} \cos \delta_{iL0}) \Delta \delta_{iL} \quad (9)$$

式中:  $\delta_{ij0}$ 、 $\delta_{iL0}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$ 、节点  $i$  和节点  $L$  间角度差初始值;  $\Delta \delta_{ij}$ 、 $\Delta \delta_{iL}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$ 、节点  $i$  和节点  $L$  间角度差变化量。由于故障瞬间构网型储能、同步发电机内电势角度不突变, 可得

$$\delta_{ij} = 0 \quad (10)$$

根据  $\sum_{i=1}^n \Delta P_i = \Delta P_{\text{Load}}$ , 得到节点  $i$  的功率波动量为

$$\Delta P_i = \frac{P_{\text{sil}}}{\sum_{j=1}^n P_{\text{sjL}}} \Delta P_{\text{Load}} \quad (11)$$

式中,  $P_{\text{sil}}$ 、 $P_{\text{sjL}}$  分别为节点  $i$  和节点  $L$  间、节点  $j$  和节点  $L$  间同步功率系数。可以看出, 扰动瞬间有功功率分配按照电源点至功率扰动点的同步功率系数分配。对于构网型储能系统, 功率波动量可进一步表示为

$$\Delta P_{\text{bess}} \approx \Delta P_{\text{Load}} \frac{x_d'' + x_{SL}}{(x_d'' + x_{SL}) + (x_{\text{filt}} + x_{\text{viren}} + x_{\text{BL}})} \quad (12)$$

式中:  $\Delta P_{\text{bess}}$  为构网型储能有功功率变化量;  $x_d''$  为同步机次暂态电抗;  $x_{SL}$  为同步机与节点  $L$  间转移电抗;  $x_{\text{filt}}$ 、 $x_{\text{viren}}$ 、 $x_{\text{BL}}$  分别为构网型储能滤波电抗、稳态投入的虚拟电抗、与节点  $L$  间转移电抗。

同理, 若系统发生  $\Delta Q_{\text{Load}}$  的无功功率扰动, 不同类型电源无功出力变化量线性化表达式为

$$\begin{aligned} \Delta Q_i = & \sum_{j=1, j \neq i, L}^n B_{ij} \cos \delta_{ij} (E_{i0} \Delta E_j + E_{j0} \Delta E_i) - \\ & E_{i0} B_{iL} \cos \delta_{iL} \Delta V_L - (V_{L0} B_{iL} \cos \delta_{iL} + 2B_{ii} E_{i0}) \Delta E_i \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $\Delta Q_i$  为电源节点  $i$  的无功输出变化量;  $E_{i0}$ 、 $E_{j0}$ 、 $V_{L0}$  分别为节点  $i$ 、节点  $j$  和节点  $L$  的电压幅值初始值;  $\Delta E_i$ 、 $\Delta E_j$ 、 $\Delta V_L$  分别为节点  $i$ 、节点  $j$  和节点  $L$  的电压幅值变化量。

对于电压源, 其内电势幅值为状态量, 同样具备不突变属性, 即  $\Delta E_i = \Delta E_j = 0$ , 可得

$$\Delta Q_i = -E_{i0} B_{iL} \cos \delta_{iL} \Delta V_L \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N \Delta Q_i = \Delta Q_{\text{Load}} \quad (15)$$

$$\Delta Q_i = \frac{P_{\text{sil}}}{\sum_{j=1}^n P_{\text{sjL}}} \Delta Q_{\text{Load}} \quad (16)$$

由上式可知, 与有功分配类似, 扰动瞬间无功功率分配按照电源点至功率扰动点的同步功率系数分配。

## 2.2 构网型设备占比分析

以图4为例, 分析系统中构网型设备的最低占比需求。其中, 假设储能(构网型)、新能源(以光伏为例, 跟网型)升压变容量与装机容量相等, 升压变漏抗为10%。构网型储能内阻抗按0.14 p.u.考虑(类

比同步机、调相机等常规机组次暂态电抗参数，实际应用取决于设计参数)。

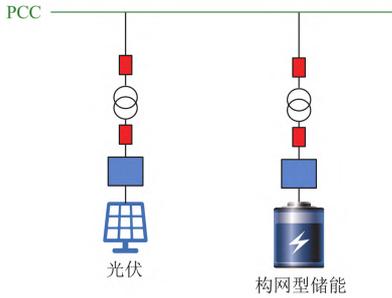


图 4 构网型储能、光伏电站接入系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid-forming BESS and photovoltaic power station access system

首先，定义构网型储能装机占比  $P_{GFM}$ 。

$$P_{GFM} = \frac{S_{GFM}}{S_{GFM} + S_{GFL}} \quad (17)$$

式中， $S_{GFM}$ 、 $S_{GFL}$  分别为构网型、跟网型设备装机容量。

短路比  $S_{CR}$  为

$$S_{CR} = \frac{S_{ac}}{P_N} = \frac{1}{|Z_k|} \quad (18)$$

式中： $S_{ac}$ 、 $P_N$  分别为节点短路容量、新能源有功功率； $|Z_k|$  为等效电抗。

根据式(17)、式(18)得到光伏电站机端短路比  $S_{CRg}$  为

$$S_{CRg} = \frac{1}{\frac{(1/7 + 0.1)}{P_{GFM}} + \frac{0.1}{1 - P_{GFM}}} \times \frac{1}{1 - P_{GFM}} \quad (19)$$

根据 GB/T 40581-2021《电力系统安全稳定计算规范》要求：新能源发电单元升压变低压侧多场站短路比应不小于 1.5，且新能源并网点多场站短路比应不小于 2.0、宜大于 3.0<sup>[25]</sup>。将  $S_{CRg} = 1.5$  代入式(19)，得到  $P_{GFM} = 0.3$ 。

因此，基于上述条件得到的构网型电源装机占比应不低于 30%。实际电网考虑的制约因素更复杂，还需结合电网负荷特性、网架条件和电网安全稳定考核标准等开展详细分析。

### 3 实践案例

#### 3.1 工程介绍

我国北方某地区新能源资源丰富，近年来，随着负荷增长、新能源开发规模增大，存在新能源消纳受限、负荷末端电压支撑能力不足等问题。该地区电网处于电网末端，其地理接线图如图 5 所示。

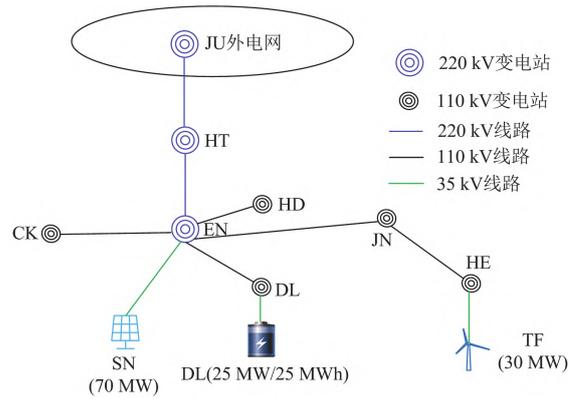


图 5 系统地理接线图

Fig. 5 System geographical wiring diagram

由图 5 可以看出，该地区电网包含 70 MW 光伏电站、30 MW 风电场，而与交流主网仅通过单回 220 kV 线路联络，地区电网对于新能源、负荷的承载能力不足。从故障扫描结果来看，由于缺乏短路容量支撑，该地区电网存在由于 EN 变电站主变  $N-1$  故障导致的暂态电压失稳问题。图 6 为 220 kV EN 变电站发生主变  $N-1$  故障后系统电压响应曲线。

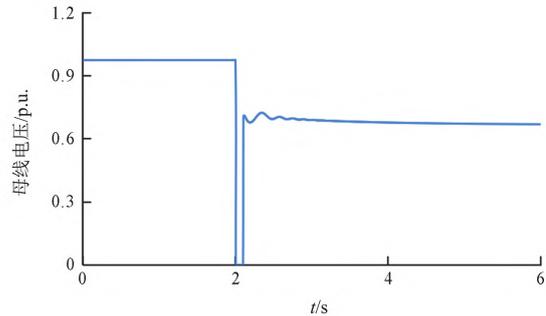


图 6 EN 变电站 220 kV 母线电压响应曲线

Fig. 6 Voltage response curve for 220 kV bus of EN substation

#### 3.2 构网型储能容量规划

为了提升稳定性，拟在负荷中心 DL 变电站规划建设构网型储能。其主要应用如下：

- 1) 提升并网运行情况下末端电网短路容量；
- 2) 220 kV 联络线故障转孤岛运行后，由储能+新能源为重要负荷供电，提升可靠性。

基于上述目标，首先分别通过并网方式下多场站短路比计算和暂态故障扫描初步确定构网型储能容量，其次通过电力电量平衡计算确定孤岛方式新能源开机规模(为了保障孤岛方式 10 MW 重要负荷连续供电，需保留光伏 30 MW，风电 15 MW 开机)，再次迭代计算孤岛方式下多场站短路比，并重新进行故障扫描，最终确定构网型储能容量需求。完整的分析流程如图 7 所示。

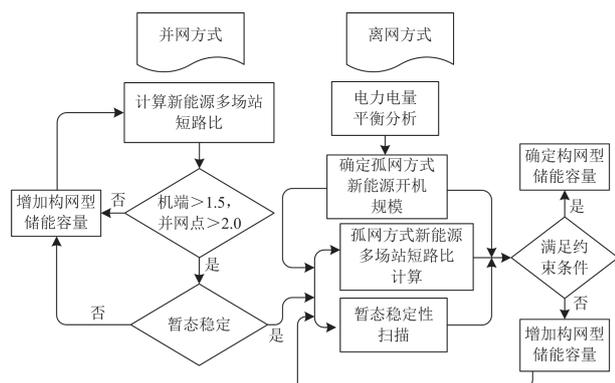


图7 构网型储能容量分析流程

Fig. 7 Analysis process for capacity calculation of grid-forming BESS

并网、离网方式下光伏电站机端、并网点多场站短路比计算结果如表1所示。为了保障孤网方式系统稳定性, 构网型储能容量建议选取为25 MW。构网型储能容量占孤网方式总装机的41.67%, 与前述30%的计算结果有差异, 其原因在于风电场与构网型储能间需经2级共计205 km的110 kV输电线路实现联络, 末端风电场短路比偏低。综合考虑系统电力电量平衡及稳定性扫描结果, 最终构网型储能容量选取为25 MW/25 MWh。

表1 不同方式和储能容量下新能源短路比对比

Table 1 Comparison of short circuit ratio of new energy under different modes and energy storage capacity

储能容量/MW	并网方式		孤网方式	
	机端	并网点	机端	并网点
15	1.65	3.12	1.17	1.47
20	1.98	3.36	1.34	1.69
25	2.37	3.58	1.58	2.11

25 MW/25 MWh 储能系统经升压变接入35 kV母线。各储能单元拓扑结构如图8所示, 储能单元电池经串并联构成4组电池单元, 每个电池单元接入1台630 kW容量DC/AC储能变流器, 4台PCS变流器并联接入升压变压器低压侧。

### 3.3 仿真验证

#### 1) 功率阶跃扰动

为了验证构网型储能参与电网功率分配分析结论, 设置扰动为并网方式下第2 s时DL站负荷有功功率下阶跃5 MW, 储能初始功率为0 MW。储能系统与外电网等值电源有功出力响应如图9所示。

同样, 仿真第2 s时DL站负荷无功功率上阶跃5 Mvar情况下的储能系统与外电网等值电源无功出力响应, 如图10所示。

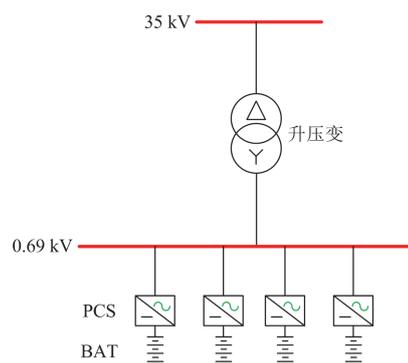


图8 储能接入系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of grid-connected BESS

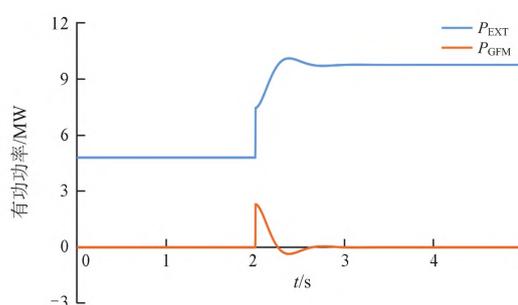


图9 储能、外电网有功功率响应曲线

Fig. 9 Active power response curve of BESS and external power grid

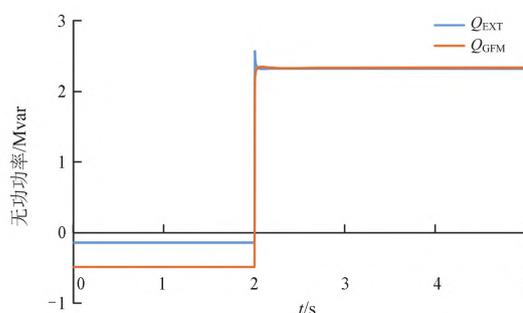


图10 储能、外电网无功功率响应曲线

Fig. 10 Reactive power response curve of BESS and external power grid

基于仿真结果, 分别计算扰动瞬间构网型储能与外电网的暂态功率分配情况, 如式(21)所示。

$$\frac{\Delta P_{\text{GFM}}}{\Delta P_{\text{EXT}}} = 0.87 \approx \frac{\Delta Q_{\text{GFM}}}{\Delta Q_{\text{EXT}}} = 0.94 \approx \frac{X_{\text{EXT-load}}}{X_{\text{GFM-load}}} = 0.90 \quad (21)$$

可以看出, 构网型储能在扰动时刻能够瞬时响应系统不平衡功率, 且其参与分配的功率比例与常规机组类似, 与内电势至扰动点电气距离成反比, 与前文分析结论一致。

### 2) 短路故障

为了进一步验证构网型储能的电压源支撑能力, 设置第 2 s 时系统对外联络线发生三相金属性接地短路故障, 100 ms 后保护动作切除联络线, 系统转为孤岛运行。系统电压、频率及构网型储能有功、无功功率暂态响应曲线如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 在系统发生故障导致非计划性转孤岛运行后, 构网型储能可实现末端供电系统运行方式无缝切换, 且无需控制模式切换, 提升供电可靠性。

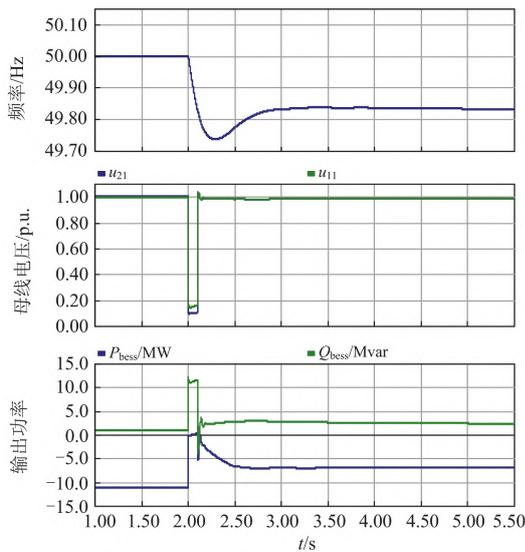


图 11 系统并离网切换实验结果

Fig. 11 Experimental results of transfer between grid-connected and islanding mode

## 4 结论与展望

本文探讨构网型储能在新电力系统中的应用。通过理论分析和仿真计算, 得到以下结论:

1) 借鉴常规机组励磁、调速控制器特性, 建立构网型储能机电暂态分析模型, 实现类似常规发电机的支撑作用;

2) 构网型储能具备类似常规同步发电机的电压源+自同步控制特性, 其在电网扰动后瞬间变化功率按照电源点至功率扰动点的同步功率系数分配;

3) 基于国内某构网型储能的工程案例分析表明, 构网型储能提升新能源多场站短路比、运行方式无缝切换等方面具备明显优势, 有效提升了系统稳定水平。

构网型储能在国内外的应用尚处于起步阶段, 为了进一步挖掘其在大电网层面的应用潜力, 后续可从以下几个方面开展相关工作:

1) 推进基于国内主流大电网仿真平台的构网

型设备模型开发工作, 支撑工程规划应用;

2) 围绕构网型储能过流能力选取、对传统继电保护适应性等方面, 完善构网型技术在大电网层面应用的相关标准体系建设;

3) 探索构网型储能参与电力辅助服务市场的创新机制, 建立构网型储能参与系统调峰、调频、转动惯量等辅助服务及评价体系。

## 参考文献

[1] 国家能源局. 国家能源局 2022 年二季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. [2022-04-29]. [http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c\\_1310579541.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c_1310579541.htm).

[2] 王渝红, 陈立维, 曾琦, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 160-170.

WANG Yuhong, CHEN Liwei, ZENG Qi, et al. Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 160-170.

[3] 毛颖群, 张建平, 程浩忠, 等. 考虑频率安全约束及风电综合惯性控制的电力系统机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 60-70.

MAO Yingqun, ZHANG Jianping, CHENG Haozhong, et al. Unit commitment of a power system considering frequency safety constraint and wind power integrated inertial control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 60-70.

[4] 王淑超, 孙光辉, 俞诚生, 等. 光伏发电系统级快速功率调控技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6254-6263, 6487.

WANG Shuchao, SUN Guanghui, YU Chengsheng, et al. Photovoltaic power generation system level rapid power control technology and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6254-6263, 6487.

[5] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国质检出版社, 2021.

Technical specification for connecting wind farm to power system: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2021.

[6] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.

LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.

[7] 郑华, 赵志强, 刘斯伟, 等. 适应新型电力系统快速频率支撑需求的混合型储能系统动态建模及其控制策略分析[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 13-21.

- ZHENG Hua, ZHAO Zhiqiang, LIU Siwei, et al. Modelling and control of hybrid energy storage system with fast frequency response in new power system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 13-21.
- [8] 胡彬, 吴超, 年珩, 等. 薄弱电网下新能源设备并网锁相同步方式综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 26-34, 41.
- HU Bin, WU Chao, NIAN Heng, et al. Overview of phase-locked synchronization methods of renewable energy equipment in weak and distorted grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 26-34, 41.
- [9] LASSETER R H. Microgrids[C] // 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 27-31, 2002, New York, USA: 305-308.
- [10] ROSSO R, WANG X, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Application, 2021, 2: 93-109.
- [11] UNRUH P, NUSCHKE M, STRAU P, et al. Overview on grid-forming inverter control methods[J]. Energies, 2020, 13(10): 1-21.
- [12] TAYAB U B, BIN R M A, HWAI L J, et al. A review of droop control techniques for microgrid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 717-727.
- [13] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-349.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [14] EBRAHIMI M, KHAJEHODDIN S A, KARIMI G M. An improved damping method for virtual synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1491-1500.
- [15] AWAL M A, HUSAIN I, Yu W, et al. Selective harmonic current rejection for virtual oscillator controlled grid-forming voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8805-8818.
- [16] YU Jiale, QI Yang, DENG Han, et al. Evaluating small-signal synchronization stability of grid-forming converter: a geometrical approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9087-9098.
- [17] 倪泽龙, 林钰钧, 王治涛, 等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 85-93.
- NI Zelong, LIN Yujun, WANG Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93.
- [18] ROSCOE A, KNUEPPEL T, SILVA R D, et al. Response of a grid forming wind farm to system events, and the impact of external and internal damping[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(19): 3908-3917.
- [19] CHEREVATSKIY S, ZABIHI S, KORTE R, et al. A 30 MW grid forming BESS boosting reliability in south Australia and providing market services on the national electricity market[C] // 18th International Wind Integration Workshop, 2019, Dublin, Ireland: 1-8.
- [20] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.
- LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.
- [21] 中国电力网. 政策汇总: 20 个省市光伏配储能要求[EB/OL]. [2022-03-01]. <http://www.chinapower.com.cn/tynfd/hyyw/20220301/136175.html>.
- [22] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [23] 陈磊, 刘辉, 闵勇, 等. 两区域互联系统联络线功率波动理论分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 53-58.
- CHEN Lei, LIU Hui, MIN Yong, et al. Theoretical analysis on tie-line power oscillation of two-area interconnected system[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 53-58.
- [24] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. AMES, IOWA: Iowa State University Press, 1977.
- [25] 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国质检出版社, 2021.
- Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2021.

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-11-02

作者简介:

王新宝(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大电网安全稳定分析; E-mail: wangxb@nrec.com

葛景(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子设备建模与稳定性分析。E-mail: gejing@nrec.com

(编辑 姜新丽)