

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2021.0002.014

基于储能型 SNOP 功率反馈控制策略的研究与仿真*

陆 旭, 纪泽宇, 陈 晨

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:针对由于新能源发电出力的随机性和以新能源汽车为代表的新一代负荷接入配电网的不确定性所导致的功率不平衡问题,提出了基于储能型 SNOP 的功率反馈控制策略;该控制策略以交流系统有功功率不平衡所导致的频率差值作为反馈量,并通过功率电流环控制端口变流器的有功功率传输,从而实现根据有功负荷的变化进行有功潮流实时控制,同时储能的加入使 SNOP 高度集成为一种具有能量存储功能的能量中转装置,可以在一定范围内缓解功率波动,增大了 SNOP 的调度能力;随后利用 DigSILENT/PowerFactory 建立储能型 SNOP 的柔性互联仿真模型,通过投切有功负荷的方式验证了控制策略的有效性;仿真结果表明:该控制策略能够充分利用储能装置实时协调馈线之间的功率平衡。

关键词:储能型 SNOP;功率反馈控制;功率平衡;柔性互联

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2021)02-0090-06

0 引 言

随着低碳技术日益受到重视, DG、储能以及电动汽车广泛地接入低压配电网中,使得相邻馈线之间可能会出现不平衡负荷,这将会导致更高的电压损耗以及电压质量问题^[1-2]。伴随电力电子技术的迅速发展,以及控制策略的多样性,可以开发出一个灵活、可靠、高效的柔性开关设备,进而提高运行效率和配电可靠性^[3]。

SNOP(Soft Normally Open Point)作为一种新型电力电子装置,用于取代传统的配电网联络开关,可以实现连接馈线之间的电力潮流灵活调节^[4]。SNOP“交-直-交”的运行方式为储能的接入提供了可能,通过在 SNOP 的直流侧安装储能装置可将 SNOP 扩展为具有能量存储的集成系统,当配电网无法及时消纳或者提供相应的功率时,储能装置的加入可以有效解决此类问题^[5]。

储能型 SNOP 最早提出是用于减轻由于快速移动的云层覆盖而引起的光伏系统功率输出瞬变的影响^[6]。通过合理的充放电控制,可以使 SNOP 在具备功率传输的同时进一步具备能量储存功能^[7]。在配电网优化方面,储能的加入使各端口控制有功潮流的自由度得到提高,同时大大提升了 SNOP 的潮流控制能力^[8-10]。现有的研究主要集中于两种设备联合接入配电网的运行优化方法,并且现阶段研究均以大电网为平台,负荷的变化对电网的影响相对较小,并不适用于有源微网。

本文在有源微网的基础上,讨论了双端口储能型 SNOP 的拓扑结构以及数学模型,在恒功率控制的基础上提出了一种适用于储能型 SNOP 的功率反馈控制策略,该控制策略以交流系统通过功率反馈环节有功功率不平衡所导致的频率差值作为反馈量,控制端口变流器的有功功率传输,从而实现系统的功率平衡。通过在 DigSILENT/PowerFactory 上搭建双端有源微电网柔性互连模型,验证了控制策略

收稿日期:2020-04-25;修回日期:2020-05-26.

* 基金项目:电力传输与功率变换控制教育部重点实验室开放课题资助(2020AC01);安徽理工大学 2019 创新基金项目(2019CX2046).

作者简介:陆旭(1995—),男,安徽淮南人,硕士研究生,从事智能互联网与柔性互联研究.

的可行性。

1 储能型 SNOP 系统

1.1 系统简介

通过传统 SNOP 的直流侧安装储能装置便可构成储能型 SNOP 系统,用于取代传统的联络开关,实现交流馈线间的柔性互联。储能型 SNOP 接入位置如图 1 所示。它由两个以背靠背方式布置的变流器和一个储能装置组成,变流器的交流侧连接两侧馈线,直流侧和储能连接在公共的直流母线上。它不仅可以实现不同馈线之间传输功率的实时调节,而且可以在一定范围内稳定功率波动。

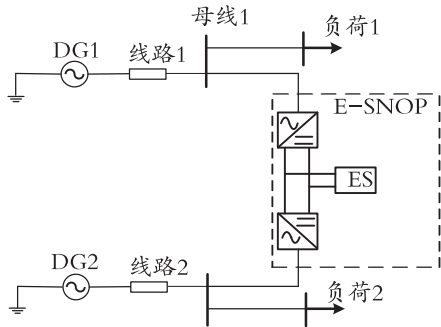


图 1 储能型 SNOP 的接入位置

Fig. 1 Access location of SNOP with energy storage

1.2 储能型 SNOP 数学模型

本文采用背靠背电压源变流器 (BTB-VSC) 拓扑结构,它由两个连接两侧交流系统的 VSC 和直流母线组成,储能装置可直接连接在直流侧母线上。由于 BTB-VSC 拓扑结构完全对称,为了简化,对其中一个端口进行分析,图 2 所示的是储能型 SNOP 单侧拓扑结构图。

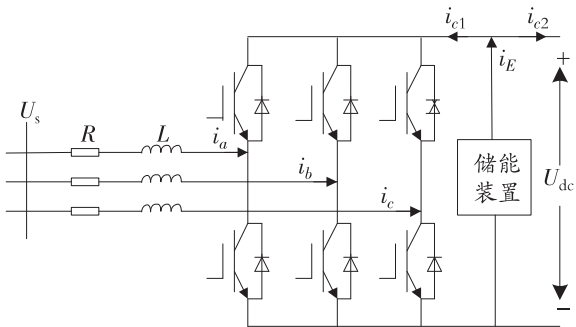


图 2 储能型 SNOP 拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of SNOP with energy storage

将三相静止 abc 坐标系通过派克变化换成同步的旋转 dq 坐标系,即可转化为如式(1)所示的旋转 dq 坐标系下的两侧 VSC 动态微分方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dk} \\ i_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_k \\ \omega_k & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dk} \\ i_{qk} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{U_{dc} \cdot S_{dk} - U_{dk}}{L} \\ \frac{U_{dc} \cdot S_{qk} - U_{qk}}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: $k=1,2$; U_{kd} 和 U_{kq} 分别表示端口 k 输出交流电压的 d 轴和 q 轴分量; i_{kd} 和 i_{kq} 分别表示端口 k 输出交流电流的 d 轴和 q 轴分量; S_{dk} 和 S_{qk} 分别表示端口 k 变流器开关调制函数的 d 轴和 q 轴分量; ω_k 为 k 侧交流系统相电压的角频率; U_{dc} 为直流侧电压。

忽略电压损耗,根据瞬时功率原理,当两侧交流系统三相稳定,直流侧电压恒定时,两侧 VSC 的输出有功功率 P_k 和无功功率 Q_k 可定义如式(2)所示:

$$\begin{cases} P_k = \frac{3}{2} U_{kd} i_{kd} \\ Q_k = \frac{3}{2} U_{kq} i_{kd} \end{cases}, k=1,2 \quad (2)$$

通过控制 i_{kd} 的值就可以控制 k 端口 VSC 有功功率的输出值,通过控制 i_{kq} 的值就可以控制 k 端口 VSC 无功功率的输出值,从而实现独立控制有功功率和无功功率。

从直流侧有功功率稳定角度考虑,各端口 VSC 以及储能装置有功功率输如式(3)所示:

$$\begin{cases} P_1 = U_{dc} i_{dc1} \\ P_2 = U_{dc} i_{dc2} \\ P_E = U_{dc} i_E \end{cases} \quad (3)$$

其中: i_{dc1} 和 i_{dc2} 和分别表示由直流侧分别流向 1,2 端口 VSC 的电流值; i_E 表示储能装置流向直流母线的电流值; P_E 指储能装置充电或放电的有功功率值。在正常情况下,忽略各变换器以及储能装置自身损耗,双端口变流器以及储能装置的有功功率关系如式(4)所示:

$$P_E = P_1 + P_2 \quad (4)$$

1.3 储能型 SNOP 工作原理

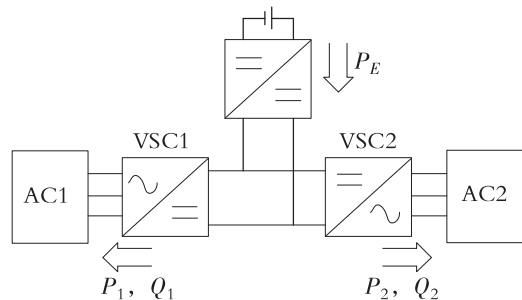


图 3 储能型 SNOP 原理图

Fig. 3 Schematic diagram of SNOP with energy storage

储能型 SNOP 原理图如图 3 所示,功率方向按

照原理图功率流向箭头方向为正。忽略功率损耗的条件下,两侧 VSC 在满足有功功率约束和容量约束的前提下,输出的有功功率以及储能装置所发出的有功功率应满足相加之和为零的条件。VSC 发出的无功功率相对独立,需满足双端 VSC 的无功功率约束和容量约束。储能型 SNOP 运行有功功率应满足的条件如式(5)所示:

$$\begin{cases} P_i + P_j = P_E \\ P_i^2 + Q_i^2 \leq S_i^2 \\ P_j^2 + Q_j^2 \leq S_j^2 \end{cases} \quad (5)$$

由于本文所采用的储能装置直接连接到 SNOP 直流侧母线,所以本身不具有功率潮流控制能力,需要由两侧变流器协调控制其功率输出。储能装置控制模式如下所述:

空闲模式:当 VSC1 和 VSC2 向交流母线发出或吸收的有功功率相等($P_1 = P_2$)时,储能装置主要用于稳定直流侧母线的电压,不参与有功功率调节($P_E = 0$)。

充电模式:当 VSC1 和 VSC2 向交流母线发出或吸收的有功功率之和大于零($P_1 + P_2 > 0$)时,储能装置在稳定直流电压的同时充电以吸收系统多余的有功功率($P_E = |P_1| - |P_2|$)。

放电模式:当 VSC1 和 VSC2 向交流母线发出或吸收的有功功率之和小于零($P_1 + P_2 < 0$)时,储能装置在稳定直流电压的同时放电以补充系统缺失的有功功率($P_E = |P_1| - |P_2|$)。

2 储能型 SNOP 功率反馈控制

为了满足储能型 SNOP 灵活控制潮流,本文提出一种基于储能型 SNOP 功率反馈控制策略,主要由外环功率反馈控制、功率中环控制、电流内环控制 3 环组成。

2.1 功率反馈控制

微电网中新能源出力与负荷处于实时波动状态,且多以有功功率的方式输入或输出,故将会导致有功功率的不平衡。根据频率-有功下垂特性,有功的变化必然会导致交流母线的频率变化。为了消除这种有功功率不平衡,提出如图 4 所示的功率反馈控制。

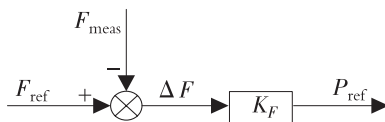


图 4 有功功率反馈控制

Fig. 4 Active power feedback control

功率反馈控制以 VSC 所连交流侧母线的频率 F_{meas} 为输入量,将所测的频率值与设定值 F_{ref} 的差值 ΔF 经过比例环节得到有功功率的设定值 P_{ref} 作为功率电流环的输入信号,进而控制接口变换器的有功功率传输。反馈特性如式(6)所示:

$$P_{ref} = P_0 + (F_{meas} - F_{ref}) K_F \quad (6)$$

其中: P_{ref} 为 VSC 处于 PQ 控制模式下的有功功率设定值; F_{meas} 为 VSC 所连交流母线的测量值; P_0 为 VSC 初始输出的有功功率值; F_{ref} 为频率的设定值,取 50 Hz; K_F 为频率的功率反馈系数,如式(7)所示:

$$K_F = \frac{P_{max} - P_0}{F_{ref} - F_{min}} \quad (7)$$

其中: P_{max} 为有功负荷增加时分布式电源频率下降时允许输出的最大功率; F_{min} 为分布式电源允许的最小频率。

2.2 功率反馈控制策略

一般来说,正常情况下 BTB-VSC 型 SNOP 是在 PQ- U_{dc} -Q 控制模式下运行的,一个 VSC 用于控制有功和无功功率,另一个用于稳定直流侧电压。稳定的直流侧电压是 SNOP 中最重要同时也是最薄弱的部分,当直流侧电压无法稳定时,整个 SNOP 系统将崩溃。然而将储能装置安装在直流侧,可视为一个可控恒压源,通过充放电控制可以维持直流侧的功率平衡,从而达到稳定直流侧母线电压的作用。

综上所述,储能型 SNOP 两端均采用功率反馈控制,整体控制框图如图 5 所示。外环功率反馈控制以 VSC 所连交流侧母线的频率 F_{meas} 和频率设定值 F_{ref} 作为输入量,通过外环功率反馈控制得到的有功功率设定值 P_{ref} 作为输出值,将 P_{ref} 和可独立设置的无功功率设定值 Q_{ref} 输入到功率中环进行比较,由计算得到 VSC 的实际发出功率 p, q ,并将其误差通过 PI 限幅环节,得到电流内环的参考信号 i_{d_ref} 和 i_{q_ref} 。将参考信号与坐标变换所得到的 i_d 和 i_q 进行比较,然后将其误差通过 PI 环节,得到 VSC 调制的电压信号,根据有功功率变化的频率偏差值实现有功功率平衡。

采用功率反馈控制的 SNOP,功率总是流向负荷需求更大的交流侧。同时有储能的支撑,这使得负荷波动无论发生在哪一侧,两侧交流系统以及储能都会协同平衡负荷的波动,达到功率平衡,从而实现了能源的合理利用。

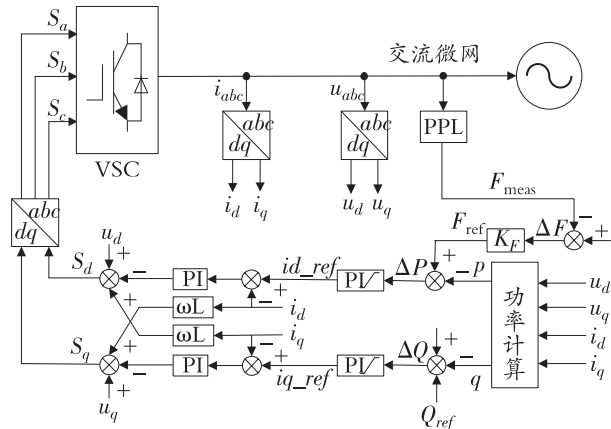


图 5 整体控制框图

Fig. 5 Overall control block diagram

3 仿真设计

本文以 DigSILENT/PowerFactory 作为平台,搭建了如图 6 所示的有源微网通过储能型 SNOP 柔性互联仿真模型。系统中主要仿真参数见表 1。

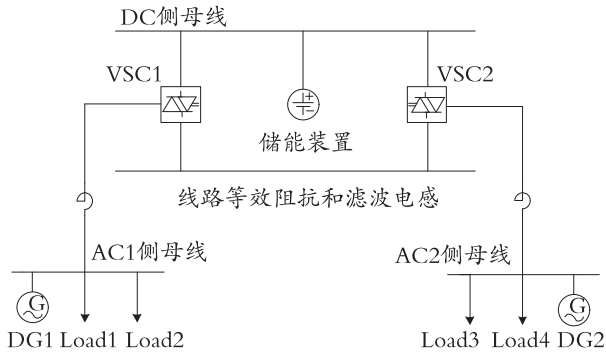


图 6 储能型 SNOP 仿真结构图

Fig. 6 The simulation structure of E-SNOP

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the system

参数	符号	数值	单位
交流侧电压额定值	U_1, U_2	0.4	kV
直流侧电压额定值	U_{dc}	1	kV
线路等效阻抗	R_1, R_2	0.05	Ω
线路滤波电感	L_1, L_2	0.005	H
分布式电源容量	DG_1, DG_2	5	MVA
VSC 额定容量	S_1, S_2	2	MVA
AC1 侧负载	Load1, load2	0.1、0.2	MV
AC2 侧负载	Load3, load4	0.1、0.2	MW

为了模拟新能源发电出力的随机性以及以新能源汽车为代表的新型负荷接入配电网的不确定性,本文采用投切有功负荷的方式来验证控制策略的有效性。具体安排见表 2。

表 2 仿真实验安排

Table 2 Simulation experiment arrangement

	Load1	Load1	Load1	Load1
0	并网	离网	并网	并网
5	并网	并网	并网	并网
10	并网	并网	并网	离网
15	并网	离网	并网	离网
20	并网	离网	并网	并网

按照本文提出的功率反馈控制策略,功率反馈系数 K_F 设为 10。取 VSC 向交流母线,储能向直流母线传输的功率为正方向,其中储能荷电状态 (SOC) 初始值设为 0.8,仿真时长为 25 s。

由图 7 和图 8 可以看出,5 s 时,Load2 并网,AC1 侧母线负荷增加 0.2 MW,系统频率下降至 49.98 Hz,此时 AC2 侧正处于功率平衡状态,无法为 AC1 侧提供相应的有功功率,此时储能迅速响应,并通过 VSC1 向 AC1 侧提供 0.2 MW 的有功功率补偿。由图 9 可以看出:此时 SOC 持续下降,AC1 侧母线达到功率平衡,实现了储能放电为馈线提供有功功率的功能。

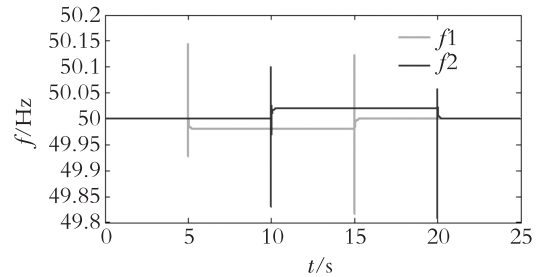


图 7 交流侧母线频率

Fig. 7 AC side bus frequency

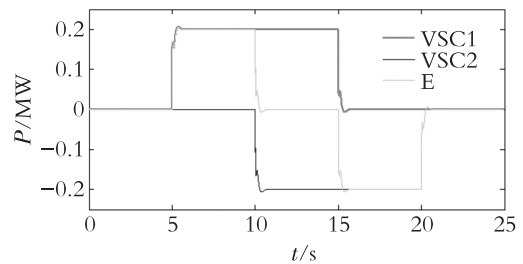


图 8 各端口及储能有功功率曲线

Fig. 8 Power curve of each port and energy storage

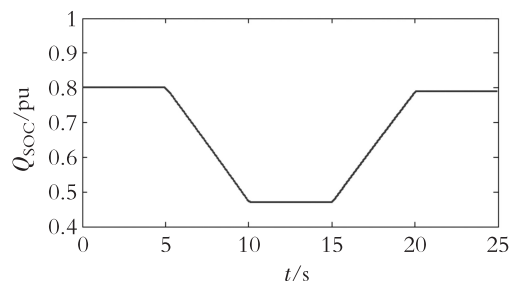


图 9 储能荷电状态

Fig. 9 SOC of energy storage

10 s 时, Load4 离网, AC2 侧母线负荷减少 0.2 MW, 系统频率上升至 5.02 Hz。多余的有功功率通过 VSC2 流入 DC 侧母线, 并通过 VSC1 输送到 AC1 侧母线, 此时储能进入空闲模式, SOC 保持不变, 两侧交流母线达到功率平衡, 实现了储能退出运行, SNOP 独自控制潮流的功能。

15 s 时, Load2 离网, AC1 侧母线功率恢复平衡, 系统频率恢复至额定值, 此时 DC 侧母线正向 AC1 侧母线吸收有功功率, 故储能迅速响应, 吸收多余的有功功率, 此时 SOC 持续上升, 使两侧母线达到功率平衡, 实现了储能充电吸收多余有功功率的功能。

20 s 时, Load4 并网, AC2 侧功率恢复平衡, 两侧交流系统频率恢复至额定值, 储能退出运行, 整个系统重新恢复到初始状态直至 25 s 时仿真结束。

在整个仿真的过程中, 由图 10 可以看出, 储能型 SNOP 在进行有功功率传输控制的同时, 交流侧母线电压均维持在正常工作水平, 同时, 储能装置的加入也能够为直流侧母线提供稳定的电压支撑。

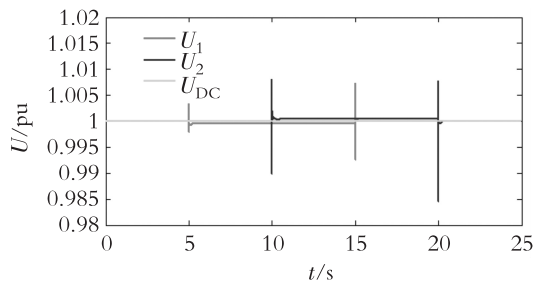


图 10 交直流母线电压

Fig. 10 AC and DC bus voltage

综上所述, 功率反馈控制在当 SNOP 所连馈线出现负荷不平衡时, 可有效控制有功功率流向有功负荷需求的一侧, 从而维持功率平衡。当馈线两侧无法达到功率平衡时, 储能的加入可以为其提供有效的有功功率支撑, 同时也能够稳定直流侧电压, 有效提高了 SNOP 灵活控制有功潮流的能力。

4 结束语

为了应对新能源发电出力的随机性以及新能源汽车为代表的新型负荷接入配电网的不确定性, 考虑了基于储能型的 SNOP 拓扑结构以及数学模型, 提出一种储能型 SNOP 的功率反馈控制策略。根据功率不平衡所导致的频率变化的差值作为反馈量, 实现灵活控制相连馈线的有功潮流, 有效控制有功潮流总是朝着负荷增大的馈线流动的目的。同时储

能的加入使 SNOP 高度集成为一种具有能量存储功能的能量中转装置, 可以在一定范围内缓解功率波动, 增大了 SNOP 的调度能力。仿真结果表明: 该控制策略能够充分利用储能实时协调馈线之间的功率平衡。

参考文献 (References):

- [1] 刘岩, 吴以岷, 徐荣敏, 等. 含智能负荷和分布式能源接入的配电网调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 116—123
LIU Y, WU Y M, XU R M, et al. Research on Distribution Network Scheduling with Smart Load and Distributed Energy Access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 116—123 (in Chinese)
- [2] 王斐, 李正烁, 叶萌, 等. 电动汽车充电对电网的影响及其优化调度研究述评[J]. 南方电网技术, 2016, 10(6): 70—80
WANG F, LI Z S, YE M, et al. Review on Research of Impact of Electric Vehicles Charging on Power Grids and Its Optimal Dispatch[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 70—80 (in Chinese)
- [3] 杨欢, 蔡云旖, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153—165
YANG H, CAI Y Y, QU Z S, et al. Key Techniques and Development Tread of Soft Open Point for Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153—165 (in Chinese)
- [4] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing Distributed Generation Penetration Using Soft Normally-open Points [C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Minneapolis, USA, 2010
- [5] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168—175
WANG C S, SONG G Y, LI P, et al. Research and Prospect for Soft Open Point Based Flexible Interconnection Technology for Smart Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168—175 (in Chinese)
- [6] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing Photovoltaic Penetration with Local Energy Storage and Soft Normally-open Points [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA, 2011
- [7] ATTANASIO F, WASTERLAINS T, PIDANCIER T, et al. Low Voltage Soft Open Point with Energy Storage: System Simulation and Prototype Preliminary Test Results

- [C]//International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Amalfi,2018
- [8] SHI T J,ZHENG H K. Multi-time Scale Control Strategy of Distribution Network Based on SOP and Energy Storage [C]//International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Sevilla,2018
- [9] 白浩,于力,姜臻,等. 基于四端 E-SOP 的有源配电网运行效率优化[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(3):89—98
- BAI H,YU L,JIANG Z,et al. Optimization of Operating Efficiency of Active Distribution Networks with Four-terminal E-Soft Open Points[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(3):89—98(in Chinese)
- [10] 岳兰. 射频溅射功率对非晶 Zn-Sn-O 薄膜性能的影响[J]. 半导体光电,2019,40(5):661—664
- YUE L. Effect of RF Sputtering Power on Properties of Amorphous zn-sn-o Films [J]. Semiconductor Optoelectronics,2019,40(5):661—664(in Chinese)

Research and Simulation of Power Feedback Control Strategy Based on SNOP with Energy Storage

LU Xu, JI Ze-yu, CHEN Chen

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China)

Abstract: Aiming at the problem of power imbalance caused by the randomness of new energy generation output and the uncertainty of new generation load access to distribution network represented by new energy vehicles, a power feedback control strategy based on SNOP with energy storage was proposed. This control strategy takes the frequency difference caused by the active power imbalance of the AC system as the feedback quantity, and controls the active power transmission of the converter through the power current loop, so as to realize the real-time control of the active power flow according to the change of the active load. At the same time, the addition of energy storage makes the SNOP highly integrated into an energy transfer device with energy storage function. In a certain range, the power fluctuation can be alleviated and the scheduling ability of SNOP can be increased. Then, a flexible interconnection simulation model of SNOP with energy storage was established by DigSILENT / PowerFactory, and the effectiveness of the control strategy was verified by switching the active load. The simulation results show that the control strategy can make full use of the energy storage to coordinate the power balance between feeders in real time.

Key words: SNOP with energy storage; power feedback control; power balance; flexible interconnection

责任编辑:李翠薇

引用本文/Cite this paper:

陆旭,纪泽宇,陈晨. 基于储能型 SNOP 功率反馈控制策略的研究与仿真[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(2):90—95

LU X,JI Z Y,CHEN C. Research and Simulation of Power Feedback Control Strategy Based on SNOP with Energy Storage[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition),2021,38(2):90—95