

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0005.007

配电网负载侧互联装置 SNOP 控制策略研究

陈 晨, 丁书音

(国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800)

摘 要:针对电力系统中新能源发电不断增加,其不均衡性和日益增长的用户负荷多样性对电网产生冲击这一问题,提出了一种基于双变压器的低压母线侧负载并联系统。利用 SNOP(Soft Normally Open Points, 智能软开关)的双向调节能力把配网系统中两个变压器低压用电侧互联,取代传统的联络开关,提高电能质量和系统的可靠性,在背靠背式 VSC(Voltage Source Converter, 电压源换流器)电路基础上添加储能系统作为 SNOP 的拓扑结构,提高了系统的可靠性,在交-直-交转换下保证能量互换的安全可靠。根据其拓扑结构建立数学模型,研究了双闭环控制结构下的控制策略,并结合储能单元综合考虑其控制策略,保证储能单元的兼容性。最后通过 MATLAB 仿真验证双闭环控制策略下的储能型 SNOP 系统理论的正确性和可靠性,试验结果表明,储能型 SNOP 可以很好地对变压器两侧负载进行互联,以此缓解重载侧变压器压力。

关键词:SNOP; 背靠背 VSC; 储能系统; 双闭环; 负载互联

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2022)05-0050-06

0 引 言

配电系统^[1]作为电网与用户之间的桥梁,肩负着为用户供给和分配电能的职能。然而由于新能源发展迅速,大量分布式电源^[2]的接入对电网的冲击尤为严重。与其他发达国家相比,我国的配电侧网络发展起步较晚,多样性的负荷变化对原有较为落后的配电网产生的冲击更为严重,同时电力设备的投入数量增多但性能不够优越,使得电能质量较低,停电事故频发,对经济发展和居民生活产生严重影响。

SNOP(Soft Normally Open Points, 智能软开关)^[3-7]是一种用于设置在传统联络开关处的全控型装置,其可以对联接的两侧系统进行双向功率传输,使得两侧有功与无功联系起来,互相补给保证系统的可靠性,同时可以通过控制策略提高输电质量。

文献[8]提出了一种把储能系统添加到风力发电系统中来弥补风力出力不均衡的输电方式,其控制策略以风电场作为输送端对有无功进行单独控制,接收端利用储能系统补充或者吸收风电场传输的功率,其差值作为逆变器的直流电压控制器进行控制,可对风电场的发电不均、接收端故障进行较好地调控。文献[9]提出了一种以交流侧电压相位和幅值为控制对象,有功、无功功率为被控对象的稳态模型^[8-10],利用基波幅值和相位的控制从而间接控制网侧电流的间接控制法,但是其控制缺点较为突出,网侧电流动态响应较慢,对系统参数要求较高。文献[10]将变换系统分为主从两个子系统,利用逆变侧的动态数据,反馈到整流侧,控制其功率传输的匹配,使其直流侧功率流动不变,主从控制可有效保证功率传输的准确性,减小误差,同时可快速完成响应需求。文献中 SNOP 均以背靠背 VSC(Voltage Source Converter, 电压源换流器),其结构简单,控制易于实现,可进行满容量有无功传递。但文献中缺少对带

收稿日期:2021-03-05;修回日期:2021-05-18.

作者简介:陈晨(1995—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,助理工程师,从事配网研究.

储能系统^[11-12]的双侧交流电网互联的 SNOP 控制策略研究。

以储能型 SNOP 装置为研究对象,在背靠背 VSC 的直流侧加入储能环节,构建基于 dq 坐标系的数学模型,通过对 VSC 内环电流解耦控制、外环功率恒定控制及储能系统^[13] 出口电压恒定控制策略研究配合。同时储能系统要兼顾维持直流侧电压恒定和新能源的消纳,利用控制策略配合两侧 VSC 进行不同控制目标协调控制。最后通过仿真验证 SNOP 的优越性。

1 SNOP 的数学模型

图 1 所示电路为 SNOP 拓扑结构,由两个相互对称的 VSC 和储能系统构成,在正常的工作状态下,两个 VSC 一个处于整流状态,另一个则工作在逆变状态^[14],通过 AC-DC-AC 变换,达到两侧系统电气联接的效果,并且对两侧进行能量交互。直流环节中的电容处联接储能系统,可以稳定直流母线电压,保证双向能量传输的一致,提高抗暂态扰动能力。同时可以利用储能系统作为新能源存储消纳环节,使得 SNOP 具备对电能进行时空调节的能力。

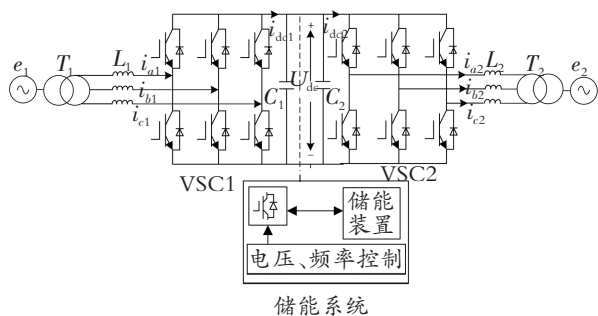


图 1 储能型 SNOP 拓扑结构

Fig. 1 Topology of the energy storage SNOP

为了更好地设计 SNOP 的控制策略,需要对其被控对象进行研究分析,根据其动态特性设计相应的控制。因此,先对 SNOP 的拓扑结构进行数学建模。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_1}{L_1} & \omega_1 \\ -\omega_1 & \frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{u_{dc} m_{d1} - e_{1d}}{L_1} \\ \frac{u_{dc} m_{q1} - e_{1q}}{L_1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_2}{L_2} & \omega_2 \\ -\omega_2 & \frac{R_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{e_{2d} - u_{dc} m_{d2}}{L_2} \\ \frac{e_{2q} - u_{dc} m_{q2}}{L_2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{m_{d1} \cdot i_{d1} + m_{q1} \cdot i_{q1}}{C_1} - \frac{m_{d2} \cdot i_{d2} + m_{q2} \cdot i_{q2}}{C_2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_{dc}}{dt} = u_{dc} - U_b \\ C_3 \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_b \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_b}{dt} = u_b \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = -i_{dc} \end{cases} \quad (5)$$

其中, ω_1, ω_2 分别为变换器两边交流侧电压角频率; $i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}$ 分别为 VSC1 和 VSC2 交流侧输出电流 d, q 分量; $e_{1d}, e_{1q}, e_{2d}, e_{2q}$ 分别为变换器交流侧电压 d, q 分量; $m_{d1}, m_{q1}, m_{d2}, m_{q2}$ 分别为变换器的开关函数 d, q 分量; u_{dc}, u_b 分别为直流母线电压和蓄电池电压。 R_1, R_2 为线路等效电阻。式(4)、式(5)分别为储能系统在 BUCK、BOOST 模式下的状态方程。

在忽略 VSC1、VSC2 开关损耗情况下,有:

$$P_k = u_{dc} (m_{ak} i_{ak} + m_{bk} i_{bk} + m_{ck} i_{ck}) = u_{dc} i_{dck} \quad k=1,2 \quad (6)$$

其中, P_k 为变换器输入或输出的有功功率,在保持直流母线电压恒定时,两个系统输出的直流相等,即可保持功率输送平衡。

2 SNOP 的运行控制策略研究

在利用 SNOP 互联交流系统时,其总体控制目标是对系统两侧的功率传递进行独立控制,而系统具体控制又分为三大部分:整流侧 VSC、逆变侧 VSC 和储能侧。三部分均采用双闭环的控制策略^[16]。3 个变换器的控制,都根据其具体实现的功能目标来控制外环,为电流内环提供电流目标值。内环控制则进行输出调制,保证电流的无静差跟踪。SNOP 的另一个特性就在于可进行双向能量交换,这就使得其控制更加灵活,两侧 VSC 的控制策略可进行相互调换。

2.1 VSC 控制策略

整流侧 VSC 和逆变侧 VSC 内环控制策略一致,都是用来控制变换器的调制电压,使变换器的输出电流可以快速跟踪外环的给定值。两个 VSC 的外环控制目标各有不同所以需要根据其具体目标设定相应的外环控制策略。

内环控制结构图如图 2 所示。为了消除耦合

相,需要利用 PI 控制器,通过交叉相消方式引入电流反馈消除了 d 、 q 轴之间的电流耦合,而对于交流

电源的干扰,则采取前馈补偿,利用电源补偿其产生的干扰。

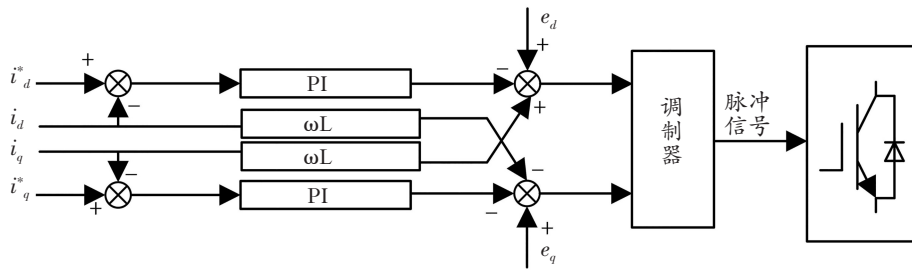


图 2 内环控制

Fig. 2 Internal loop control

VSC1 作为整流器,为保证能量传输的稳定,其基本的控制目标为直流电压稳定和无功调节。同时因为储能系统的存在,在 VSC1 侧电能足够充足的时候,还要肩负为储能系统供电的职能,可对储能系统进行电能供给,确保储能系统的 SOC 为安全可靠状态。所以对其运用 U - Q 控制策略。其中 d 轴的参考量为

$$i_d^* = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) (U_{dref} - U_{dc}) \quad (7)$$

无功分量则根据需要的功率因数而设定,可独立调节。图 3 为外环的直流电压控制原理图。其中 U_{dref} 、 Q_{ref} 为被控对象的参考值,其既可以实现对直流母线电压的恒定,又实现对交流侧的无功的调节。

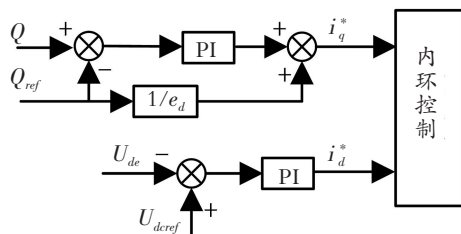


图 3 VSC1 外环控制结构

Fig. 3 The structure of outer loop control of VSC1

VSC2 工作逆变状态,其承担着为其交流侧提供能量的职责,其控制目标为所需求的有功和无功传递,此外考虑到储能 VSC1 交流侧若能量不足以使 VSC1 交流侧工作在经济状态,需要储能系统协助完成,所以 VSC2 还需要进行对储能系统能量的接收,完成储能并网任务。所以对其进行 P - Q 控制,通过控制有功功率来保证传从交流 1 侧和储能系统输送过来的有功功率满足交流 2 侧的需求,可以为变压器 2 缓解压力使其工作在经济状态,保证了其供电侧的电能质量和供电的可靠性,如图 4 所示。根据实际的测量计算可以得到 P_{ref} 值,在输入给定量控制在其附近时,可以保证传输过来的功率满足变压器 2 侧的缺

额,使得其可以工作在经济状态,保障用户侧供电质量,并且通过无功补偿,保证负载侧电压水平。

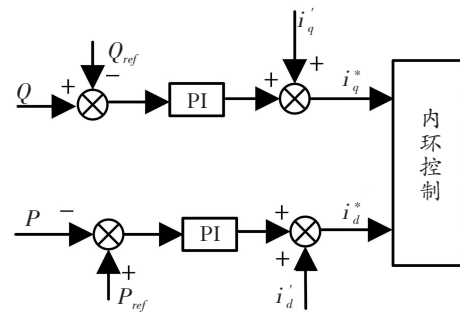


图 4 VSC2 外环控制结构

Fig. 4 The structure of outer loop control of VSC2

有功电流和无功电流的预测值是根据给定的有功无功功率通过稳态逆模型得到的,逆系统模型可以被控量传递函数逆作为控制器加入到控制系统,可以避免系统因反馈和扰动而使系统产生不稳定,同时与其他控制解耦改善系统稳定性。把其与 PI 控制输出的电流修正量相加作为电流分量的给定输入到内环系统,可以提高控制器的响应,消除静态误差。

2.2 储能系统控制

储能系统利用双向半桥 BUCK/BOOST 变换器进行模块化处理,DC/DC 变换电路作为电池的升降压电路。对于储能系统的控制策略关键要使其与 VSC 进行配合协同工作,储能系统作用不仅是维持直流母线电压恒定和新能源发电过剩的存储,还需要可以进行并网操作^[17-18]。

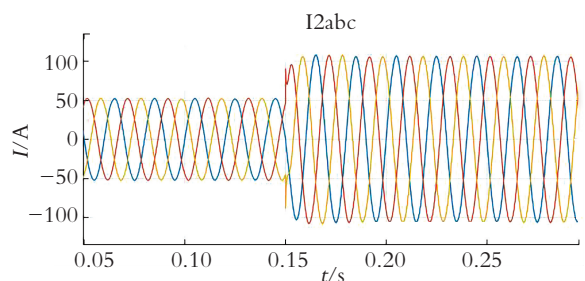
在整流侧的电能裕量较大的情况下,满足需求侧的功率时还可以继续输送功率时,则利用整流器对储能系统同时供电,此时储能系统工作在充电状态。在此控制策略下,可保证储能系统和整流侧的配合利用系统电能充裕量对储能系统进行充电,同时直流母线电压的稳定,也可以保证在两个 VSC 进行能量交互式,保持平稳输送。

在对储能系统进行运作时,BMS对总体进行监控管理,监测蓄电池的荷电状态和直流电压电流水平,使储能系统正常工作,确保电池组处在安全状态,在对电池损耗较小的情况下,实现充放电模式之间转换,确保可以与VSC之间的控制相互配合,协调运行。

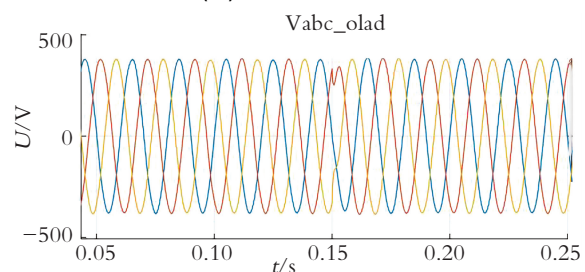
3 仿真研究

通过以上分析,使用MATLAB进行对SNOP系统进行搭建仿真以验证SNOP系统可以对两侧系统进行双向能量交互。假设交流两侧需要能量补偿,以VSC1作为整流器进行无功控制和直流电压跟踪,VSC2作为逆变器调节有功无功传输控制,均利用双环PI解耦控制,储能系统采用恒压充放电方式,保持直流母线电压恒定。

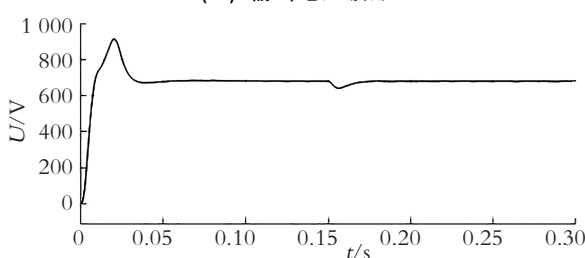
经计算,需VSC1侧传输25 kW功率使得T2工作在经济状态,所以在SNOP开始工作时,传输功率在25 kW左右,假定在0.15 s时刻,逆变侧负载侧并联接入负载25 kW,由于逆变侧变压器已经饱和,而整流侧仍有裕量足够支撑此负载,所以整流侧需要增加输出,为逆变侧提供功率支撑。具体仿真输出波形如图5所示。



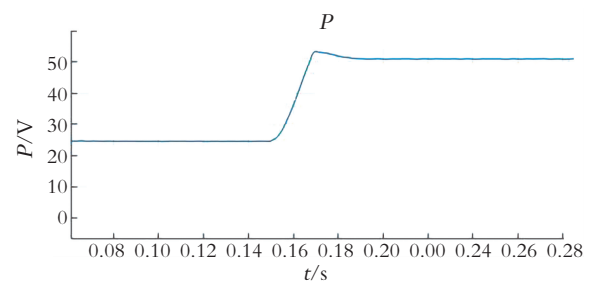
(a) 输出电流波形



(b) 输出电压波形



(c) 直流电压波形



(d) 有功波形

图5 仿真波形

Fig. 5 Simulated waveform

图5(a)为VSC2侧输出电流波形图,从图中可以看出,在前0.15 s时,系统输出稳定,在0.15 s时刻,负载增加,SNOP输出电流出现了轻微的波动,并且在之后输出电流增加,表明系统可以很好地响应逆变侧的负载变化,并及时提供能量补充。其波形畸变率在0~0.15 s时THD为1.25%,在0.15 s之后,THD为1.08%,远小于国家并网规定值,可以达到优质的并网效果,不会对原有电网产生影响。图5(b)为输出电压,可以看出电压基本稳定在380 V左右,即使在0.15 s秒时刻,出现负载突增的情况,电压波动也很小,可以保持基本不变,表明SNOP对维持系统稳定的性能较为优良,可以对突增负载和原有负载都保持电压不变供电,几乎对用户不会产生影响。图5(c)为直流侧电压,在0.15 s时出现了一个小幅度的电压跌落,但是又瞬间恢复到原有电压水平,表明了储能系统和VSC1侧直流电压控制策略下的双重稳定,可以保证直流母线电压稳定,控制策略的配合效果明显,控制策略的动态稳定性较好。图5(d)为VSC2侧实际接收的功率,在0.15 s时系统负载突增,SNOP反应较为迅速,继续为负载增加提供了25 kW的有功功率,可以准确地进行功率追踪控制。在稳态情况下,基本上与设定值相吻合,表明其可以对参考值进行稳态无误差跟踪。通过上述仿真可以表明理论的可行性,利用SNOP装置在交流系统一侧有功充足的情况下,可以对交流两侧进行补充,同时可以保证电能传输的质量,对原系统稳定并无影响。

4 结论

为了应对化石能源危机和人们日益变化的用电需求,提高新能源的利用和保障用户用电可靠是现在电力系统发展的至关重要一步。SNOP的运用对电网消纳新能源,缓解现有电网压力都有着重要的作用。通过对SNOP的控制运用,在储能系统的配

合下,不仅表明了其具有稳定直流电压,还可以对功率进行无误差的跟踪,保障了功率的双向传输能力。仿真也进一步验证了控制策略的可靠性,可以在较低的畸变率下进行并网传输功率,在储能系统的配合下,可以进行新能源的就地消纳。在接下来的研究中,将着重于其对电能可靠性的研究,在负载侧发生故障情况下,如何保障非故障相可以持续供电将和多端口馈线互联^[19]是以后研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 王岸. SNOP 的研究及其在配电网中的应用[D]. 北京:北京交通大学,2015.
WANG An. Research on snop and its application in distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [2] LEE T L, CHENG P T. Design of a new cooperative harmonic filtering strategy for distributed generation interface converters in an islanding network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1919—1927.
- [3] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2315—2322.
WANG Cheng-shan, SONG Guan-yu, LI Peng, et al. An optimization method for operation sequence of distribution network with the coexistence of tie switch and intelligent soft switch[J]. Chinese Journal of electrical engineering, 2016,36(9): 2315—2322.
- [4] 王成山,孙充勃,李鹏,等. 基于 SNOP 的配电网运行优化分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):82—87.
WANG Cheng-shan, SUN Chong-bo, LI Peng, et al. Optimization analysis of distribution network operation based on snop[J]. Power System Automation, 2015, 39(9):82—87.
- [5] 赵金利,李雨薇,李鹏,等. 基于二阶锥规划的有源配电网 SNOP 电压无功时序控制方法[J]. 高电压技术,2016,42(7):2134—2141.
ZHAO Jin-li, LI Yu-wei, LI Peng, et al. Snop voltage and reactive power timing control method for active distribution network based on second-order cone programming[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(7):2134—2141.
- [6] BLOEM J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis: IEEE,2010:1—8.
- [7] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points[C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. SanDiego:IEEE,2011:1—8.
- [8] 饶成诚,王海云,王维庆. 基于储能型的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(4):1—7.
RAO Cheng-cheng, WANG Hai-yun, WANG Wei-qing. Research on improving the stable operation capability of large-scale wind power system based on energy storage flexible DC transmission technology[J]. Power System Protection and Control,2014,42(4):1—7.
- [9] 张桂斌,徐政,王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):17—22.
ZHANG Gui-bin, XU Zheng, WANG Guang-zhu. Steady state modeling and nonlinear control of HVDC transmission system based on VSC[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2002,22(1):17—22.
- [10] HUR N, JUNG J, NAM K. A fast dynamic DC-link power balancing scheme for a PWM converter-inverter system[J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2001, 48(4): 794—803.
- [11] 马守达,杨锦成,崔乘刚,等. 能源互联网储能技术应用研究[J]. 发电技术,2018,39(5):412—418.
MA Shou-da, YANG Jin-cheng, CUI Cheng-gang, et al. Application of energy internet energy storage technology[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5):412—418.
- [12] 夏鲲,洪信炜,袁印,等. 用于电池组储能的双向 DC/DC 变换器研究[J]. 系统仿真学报,2018,30(8):3219—3228.
XIA Kun, HONG Xin-wei, YUAN Yin, et al. Bidirectional DC/DC converter for battery pack energy storage[J]. Journal of Systems Simulation, 2018, 30(8):3219—3228.
- [13] 杭丽君,李宾,黄龙,等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(12):51—58.
HANG Li-jun, LI Bin, HUANG Long, et al. A multi-resonance PR current control technology for renewable energy grid-connected inverters[J]. China Journal of Electrical Engineering, 2012, 32(12):51—58.
- [14] 沈阳武,彭晓涛,孙元章. 背靠背双 PWM 变流器的协调控制策略[J]. 电网技术,2012,36(20):146—152.
SHEN Yang-wu, PENG Xiao-tao, SUN Yuan-zhang. Coordinated control strategy of back-to-back dual PWM converter[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(20): 146—152.
- [15] 王博,肖峻,周济,等. 主动配电网中分布式电源和微网的运行域[J]. 电网技术,2017,41(2):363—370.
WANG Bo, XIAO Jun, ZHOU Ji, et al. Operation domain of distributed generation and microgrid in active distribution network[J]. Power Grid Technology, 2017, 41(2):363—370.
- [16] 邢丽娟. 背靠背电压源型变流器的研究[D]. 山东:曲

- 阜师范大学,2016.
- XING Li-juan. Research on back-to-back voltage source converter[D]. Shandong:Qufu Normal University, 2016.
- [17] 田兵,毛承雄,陆继明.微网储能变换器并网/离网无缝切换控制策略仿真[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(11):1—6.
- TIAN Bing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming. Simulation of grid/off grid seamless switching control strategy of microgrid energy storage converter[J]. Journal of Power System and Automation, 2014,26(11):1—6.
- [18] 侯朝勇,胡学浩,惠东.锂电池储能并网变换器的设计与实现[J].电网技术,2012,36(3):246—251.
- HOU Chao-yong, HU Xue-hao, HUI Dong. Design and implementation of lithium battery energy storage grid connected converter[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(3):246—251.
- [19] 王成山,宋关羽,李鹏.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 Cheng-shan, SONG Guan-yu, LI Peng. Flexible interconnection technology and prospect of intelligent distribution network based on intelligent soft switch[J]. Power System Automation, 2016,40(22):168—175.
- [20] LU Y,ZHENG M Z,TING L,et al. An improved DC-link voltage fast control scheme for a PWM rectifier-inverter system[J]. IEEE Transaction on Industry Applications. 2014,50(1):462—473.
- [21] 陈晨,何乐,赵翔.基于锂电池模块化和PCS控制策略的研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2019,36(4):36—41.
- CHEN Chen, HE Le, ZHAO Xiang. Research on modularization and PCS control strategy of lithium battery system[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2019,36(4):36—41.

Research on SNOP Control Strategy of Load Side Interconnection Device in Distribution Network

CHEN Chen, DING Shu-yin

(Suqian Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Suqian 223800, China)

Abstract: Aiming at the impact of the continuous increase of new energy generation in the power system, its imbalance and the increasing diversity of user loads on the power grid, a dual-transformer-based low-voltage bus-side load parallel system is proposed. The two-way adjustment capability of Soft Normally Open Points (SNOP) is used to interconnect the low-voltage power consumption sides of the two transformers in the distribution network, replacing the traditional tie switch, improving the power quality and system reliability. On the basis of the back-to-back Voltage Source Converter (VSC) circuit, the energy storage system is added as the topology of the SNOP, which improves the reliability of the system and ensures the safety and reliability of energy exchange under AC-DC-AC conversion. A mathematical model is established according to its topology structure, the control strategy under the double closed-loop control structure is studied, and its control strategy is comprehensively considered in combination with the energy storage unit to ensure the compatibility of the energy storage unit. Finally, MATLAB simulation is used to verify the correctness and reliability of the energy storage SNOP system theory under the dual closed-loop control strategy. The test results show that the energy storage SNOP can well interconnect the loads on both sides of the transformer to relieve the heavy load.

Key words: SNOP; back-to-back VSC; energy storage system; double closed-loop; load interconnection

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

陈晨,丁书音.配电网负载侧互联装置SNOP控制策略研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2022,39(5):50—55.

CHEN Chen, DING Shu-yin. Research on SNOP control strategy of load side interconnection device in distribution network[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022,39(5):50—55.