

# 配电网柔性互联系统多模式运行及其调控策略

段青<sup>1</sup>,沙广林<sup>1</sup>,盛万兴<sup>1</sup>,杨万里<sup>2</sup>,王志凯<sup>2</sup>,傅鲁敏<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院 配电变压器节能技术北京市重点实验室,北京 100192;

2. 湖南大学 国家电能变换与控制工程研究中心,湖南 长沙 410082;

3. 国网上海浦东供电公司,上海 200120)

**摘要:**针对基于柔性多状态开关的配电网柔性互联系统存在的多模式运行与切换、馈线负荷不均衡和主变重载问题,提出了基于虚拟同步机技术的负荷均衡调控策略和主变重载自动调控策略。首先,根据馈线与主变的负载状态,将系统进行运行模式划分;然后,针对系统的不同运行模式深入分析对应模式下的功率传输平衡关系和内在切换逻辑,应用调控策略得到多模式运行下的柔性多状态开关有功功率调控指令,实现了系统多模式稳定运行和自由切换、馈线负荷均衡以及主变重载自动调控,且无需进行控制策略切换。

**关键词:**配电网;柔性互联;虚拟同步机;柔性多状态开关;负荷不均衡;主变重载

中图分类号:TM 31;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202007025

## 0 引言

在当前配电网“闭环设计、开环运行”的供电方式下,随着太阳能、风能等分布式能源的大规模高渗透率接入<sup>[1-2]</sup>,配电网的安全稳定问题日益突出。因分布式能源存在间歇性和随机性,极易导致馈线负荷不均衡,若不主动调控潮流,还可能导致主变重载,这不仅会造成电网运行损耗大、经济性差,还可能导致电网电压波动、越限,甚至引发停电事故,严重威胁电网安全稳定运行<sup>[3-4]</sup>。为此,基于柔性多状态开关的配电网柔性互联技术受到了广泛关注<sup>[5-6]</sup>。

柔性多状态开关是一种安装在配电网中2条或多条馈线之间,能精确调控馈线间有功功率和无功功率的电力电子装置,具有响应速度快、调控方式灵活、开关频率高等优势,彻底改变了当前供电方式,在提升分布式能源消纳、均衡馈线负载、提高供电可靠性等方面具有显著优势<sup>[7]</sup>。文献[8]率先提出智能软开关SNOP(Soft Normally-Open Point),文献[9-10]在其基础上发展了柔性多状态开关。根据配电网馈线运行状态不同,SNOP在进行配电网馈线互联过程中将存在多种运行模式,而目前对SNOP运行控制的研究主要集中在单一模式下的基于定电压定功率控制的系统优化控制层面<sup>[11-13]</sup>,从SNOP设备层面进行多模式运行的控制策略研究相对较少。文献[14]

提出了一种SNOP复合控制策略均衡2条馈线负荷,但未考虑对故障模式的适应性;文献[15-16]分别提出了考虑故障运行模式的SNOP切换控制策略和自适应恢复控制策略,但是均未考虑馈线负荷均衡;文献[17]提出了某条馈线故障状态下的SNOP负荷均衡调控策略;文献[18]提出了一种实现SNOP多模式运行的模型预测协同控制策略,其计算较为复杂。然而,文献[14-18]中SNOP均采用定直流电压定有功功率控制,多模式运行时需要进行控制切换,增加了控制复杂性。为避免切换控制策略,文献[19]提出了一种SNOP的改进型下垂控制策略,但其下垂系数受电网功率波动影响较大;文献[20]提出了一种有功功率实时调整的SNOP下垂控制策略,较好地实现了馈线负荷均衡,但未考虑故障模式的适应性。文献[21]验证了基于虚拟同步机的SNOP控制策略实现配电网柔性互联的有效性;文献[22]指出基于虚拟同步机的SNOP控制策略能够实现不同运行模式间的切换,但文献[21-22]均未考虑馈线负荷均衡。另一方面,当前对SNOP的研究大多集中于设备本身,对含储能的SNOP多模式运行控制的研究相对较少,不含储能的SNOP在负荷转供时只能依靠馈线自身功率进行相互支撑,一旦某些馈线故障,则难以实现功率支撑,极大地限制了SNOP调控的灵活性,文献[23-24]指出普通SNOP在多模式运行时可能导致主变重载,而储能型SNOP因其优异的调控灵活性能较好地解决该问题。

综上,本文以含储能型SNOP的配电网柔性互联系统为对象,深入分析了系统运行模式和不同模式下的功率传输平衡关系及切换逻辑,进而针对馈线负荷不均衡和主变重载问题,提出了基于虚拟同步机技术的负荷均衡调控策略与主变重载自动调控策略,在实现系统多模式稳定运行与自由切换的同

收稿日期:2020-02-11;修回日期:2020-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577055);国家电网有限公司总部科技项目(多端口隔离型直流变换器结构优化与性能分析方法研究)(5442PD190013)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577055) and the Science and Technology Project of SGCC (Structural Optimization and Performance Analysis Method of Multi-port Isolated DC-DC Converter)(5442PD190013)

时,实现了馈线负荷均衡和主变重载自动调控,且无需切换控制策略。

## 1 配电网柔性互联系统

配电网柔性互联系统由多组变流器通过直流母线背靠背并联组成。以2条馈线互联为例,其系统结构如图1所示。

系统中SNOP替代机械联络开关安装在馈线1、2的末端进行馈线互联,SNOP包含交流端口1、2和直流端口1、2共4个端口,4个端口变流器通过750 V直流母线并联。在不考虑SNOP内部故障的条件下,交流端口1、2变流器均用三相三线制桥式拓扑,直流端口1变流器采用Boost拓扑实现光伏等分布式电源灵活接入,直流端口2变流器采用双有源桥式(DAB)拓扑连接储能蓄电池,为能量交互提供支撑,以实现直流母线电压稳定和SNOP的灵活调控。

## 2 系统运行模式与功率传输分析

当配电网运行及主变负载状态变化时,系统运行模式和功率传输情况也随之变化,必将影响潮流调控,因此需要进行系统运行模式和功率传输分析。

### 2.1 系统运行模式

经拓扑分析,SNOP两交流端口变流器 $VSC_1$ 、 $VSC_2$ 均可根据指令实现功率双向传输,在蓄电池稳压基础上,SNOP能够实现并/离网状态下的负荷供带或转供,无需进行控制策略切换<sup>[25]</sup>。根据SNOP端口并/离网状态不同,将系统运行模式分为以下3类:①柔性互联运行模式;②负荷转供运行模式;③孤岛运行模式。3类运行模式下的系统结构见附录A中图A1。

(1)柔性互联运行模式。该模式下SNOP的 $VSC_1$ 、 $VSC_2$ 均并网运行,如附录A中图A1(a)所示,馈线1、2通过 $VSC_1$ 、 $VSC_2$ 实现柔性互联,端口功率大小和方向由虚拟同步机指令控制,馈线功率可通过 $VSC_1$ 、 $VSC_2$ 实现双向流动,直流母线电压由蓄电池DAB变流器控制,分布式电源通过最大功率点跟踪

(MPPT)控制接入。此外,还可根据指令对系统进行无功补偿。

(2)负荷转供运行模式。该模式下SNOP有一个交流端口变流器离网。如附录A中图A1(b)所示,配电网2发生故障, $VSC_2$ 离网,此时馈线2侧负荷通过配电网1进行转供,馈线1功率通过 $VSC_1$ 实现双向传输,并/离网过程中 $VSC_1$ 始终采用虚拟同步机控制而无需进行控制策略切换。

(3)孤岛运行模式。该模式下SNOP的 $VSC_1$ 、 $VSC_2$ 均离网。如附录A中图A1(c)所示,配电网1和2同时发生故障, $VSC_1$ 和 $VSC_2$ 均离网,此时由分布式电源为2条馈线中的重要负载提供短时应急供电,储能DAB在保持直流母线稳压的同时,也为系统运行提供短时的能量支撑。待配电网恢复供电时,系统重新工作于模式①或②。虽然上述3类运行模式是根据本文系统划分的,但该分类具有普遍适用性。

为避免不同运行模式下可能存在的主变重载,定义变压器负载大于其自身容量的80%为重载,根据系统主变 $T_1$ 、 $T_2$ 负载状态的不同,将3类运行模式细分为9种运行模式,见附录B中表B1。当配电网运行及主变负载状态变化时,不同运行模式间能够进行自由切换,且无需切换控制策略。由于模式2、5、6分别与模式3、7、8情况类似,故仅需选择一组模式进行分析。为表明系统各运行模式之间的切换关系,附录B中图B1列出了所有模式间的切换情况,当然,有些模式切换并不一定符合实际。

### 2.2 SNOP功率传输分析

定义 $P_{ac1}$ 、 $P_{ac2}$ 分别为配电网1、2的馈线功率, $P_{VSC1}$ 、 $P_{VSC2}$ 分别为端口 $VSC_1$ 、 $VSC_2$ 功率, $P_{pv}$ 为光伏阵列的发电功率, $P_{bat}$ 为蓄电池的充放电功率, $P_{al1}$ 、 $P_{al2}$ 分别为配电网1、2馈线交流负载功率, $P_{dl}$ 为直流负载功率, $S_T$ 为 $T_1$ 、 $T_2$ 的额定容量。设流入配电网功率为正,流出交流端口功率为正,蓄电池充电功率为正。并定义 $P_{net1}$ — $P_{net3}$ 分别为系统在运行模式①—③下的临界功率,表达式如式(1)所示。

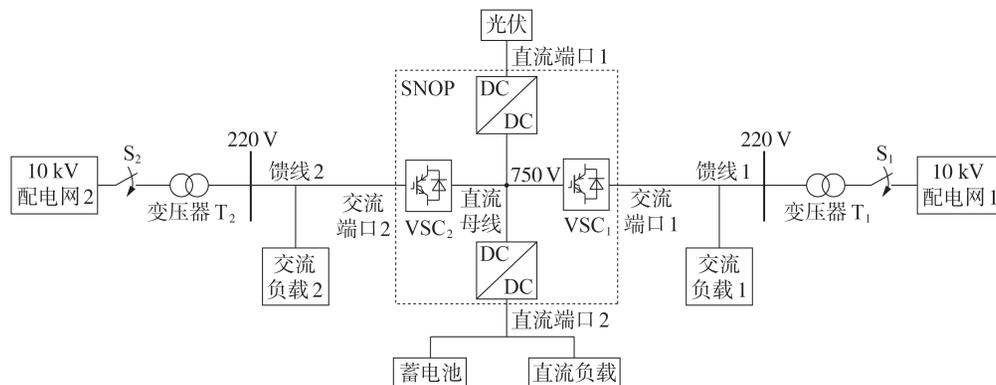


图1 配电网柔性互联系统

Fig.1 Flexible interconnection system of distribution network

$$\begin{cases} P_{\text{net1}} = 1.6S_T + P_{\text{pv}} - (P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}}) \\ P_{\text{net2}} = 0.8S_T + P_{\text{pv}} - (P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}}) \\ P_{\text{net3}} = P_{\text{pv}} - (P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}}) \end{cases} \quad (1)$$

$P_{\text{net1}}=0$  表示系统处于运行模式①下两运行主变均临界重载时所能供带的最大负载;  $P_{\text{net2}}=0$  表示系统处于运行模式②下运行主变临界重载时所能供带的最大负载;  $P_{\text{net3}}=0$  表示系统处于运行模式③下所能供带的最大负载。若  $P_{\text{net1}} \geq 0$  或  $P_{\text{net2}} \geq 0$  或  $P_{\text{net3}} \geq 0$ , 则称系统临界功率冗余, 否则称系统临界功率缺额。

为防止蓄电池过充过放以及频繁充放电, 引入荷电状态(SOC), 其值如下<sup>[26]</sup>:

$$\delta_{\text{SOC, bat}} = 100 \left( 1 - \int_0^t i_b dt / Q \right) \quad (2)$$

其中,  $i_b$ 、 $Q$  和  $t$  分别为蓄电池的开路电流、容量和充放电时间。

设蓄电池初始状态为满电, 其充放电阈值为  $\delta_{\text{SOC, min}}$  和  $\delta_{\text{SOC, max}}$ , 分别设置为 20% 和 80%。为保证蓄电池使用寿命, 避免频繁充放电, 说明如下: 当系统临界功率冗余时, 若  $\delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}}$  则蓄电池充电, 反之则蓄电池将处于浮充待机状态; 当系统临界功率缺额时, 若  $\delta_{\text{SOC, bat}} \leq \delta_{\text{SOC, min}}$  则蓄电池将处于浮充待机状态, 否则蓄电池放电。为保证系统多模式运行时的功率平衡, 必要时将根据负荷等级执行切负荷操作。为对系统多模式运行进行调控, 下面将具体分析 3 类运行模式下的系统功率传输平衡关系。

(1) 柔性互联运行模式。

a. 当  $P_{\text{net1}} \geq 0$  即系统临界功率冗余时, 有:

$$P_{\text{ac1}} + P_{\text{ac2}} + P_{\text{pv}} = \begin{cases} P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{bat}} & \delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}} \\ P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} & \delta_{\text{SOC, bat}} \geq \delta_{\text{SOC, min}} \end{cases} \quad (3)$$

b. 当  $P_{\text{net1}} < 0$  即系统临界功率缺额时, 有:

$$P_{\text{ac1}} + P_{\text{ac2}} + P_{\text{pv}} = \begin{cases} P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} & \delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}} \\ P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{bat}} & \delta_{\text{SOC, bat}} \geq \delta_{\text{SOC, min}} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 负荷转供运行模式。

a. 当  $P_{\text{net2}} \geq 0$  即系统临界功率冗余时, 有:

$$P_{\text{ac1}} + P_{\text{pv}} = \begin{cases} P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{bat}} & \delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}} \\ P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} & \delta_{\text{SOC, bat}} \geq \delta_{\text{SOC, min}} \end{cases} \quad (5)$$

b. 当  $P_{\text{net2}} < 0$  即系统临界功率缺额时, 有:

$$P_{\text{ac1}} + P_{\text{pv}} = \begin{cases} P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} & \delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}} \\ P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{bat}} & \delta_{\text{SOC, bat}} \geq \delta_{\text{SOC, min}} \end{cases} \quad (6)$$

需要说明的是, 上述分析是以模式 5 为例展开的, 模式 6—8 的分析与之类似, 不再赘述。

(3) 孤岛运行模式。

a. 当  $P_{\text{net3}} \geq 0$  即系统临界功率冗余时, 有:

$$P_{\text{pv}} = \begin{cases} P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{bat}} & \delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}} \\ P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} & \delta_{\text{SOC, bat}} \geq \delta_{\text{SOC, min}} \end{cases} \quad (7)$$

b. 当  $P_{\text{net3}} < 0$  即系统临界功率缺额时, 有:

$$P_{\text{pv}} = \begin{cases} P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} & \delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}} \\ P_{\text{al1}} + P_{\text{al2}} + P_{\text{dl}} + P_{\text{bat}} & \delta_{\text{SOC, bat}} \geq \delta_{\text{SOC, min}} \end{cases} \quad (8)$$

需要说明的是, 在模式①—③这三类运行模式下的系统功率传输平衡关系中, 当临界功率缺额且蓄电池  $\delta_{\text{SOC, bat}} < \delta_{\text{SOC, min}}$  时, 需切除部分负荷, 因此, 情况 a、b 中  $P_{\text{al1}}$ 、 $P_{\text{al2}}$ 、 $P_{\text{dl}}$  虽形式相同但数值可能不等。

### 3 系统多模式运行调控策略

系统多模式运行调控策略包括: SNOP 基本控制策略、负荷均衡调控策略和重载调控策略。其中, 负荷均衡调控策略和重载调控策略分别用于实现馈线负荷均衡以及重载主变的自动调控。

#### 3.1 SNOP 基本控制策略

系统中 SNOP 的 VSC<sub>1</sub>、VSC<sub>2</sub> 采用虚拟同步机控制, 蓄电池 DAB 变换器采用单移相控制稳定直流母线电压, 并为系统多模式运行提供一定的能量支撑, 整体控制框图见图 2。

#### 3.2 负荷均衡调控策略

对于馈线负荷均衡调控策略, 现有研究通常针对正常运行情况通过自定义指标如负载率、均衡度或简单功率均分等进行调控<sup>[14, 16]</sup>, 适用于对象单一且极少考虑故障下的均衡调控, 难以广泛推广。为此, 不失一般性, 本文以基于 SNOP 的三馈线互联系统为例推导出负荷均衡调控策略, 其同样适用于图 1 所示的柔性互联系统。所提调控策略统筹考虑了正常与故障 2 种情况, 具有普遍适用性。

(1) 正常运行时的负荷均衡调控。

正常运行时系统示意图见图 3, 具体调控如下:

$$\begin{cases} P_{\text{aci}} = P_{\text{ali}} \pm P_{\text{VSCi}} \\ P_{\text{VSCi}} = \left| P_{\text{ali}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{ali}} \right| \end{cases} \quad (9)$$

当馈线  $i$  的负载功率小于  $n$  条馈线负载功率的平均值  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{ali}}$ , 即馈线  $i$  相对轻载时, 式(9)中的“±”

取正, 表示与馈线  $i$  相连的端口吸收功率, 相当于增加了馈线  $i$  的负载; 反之, 即馈线  $i$  相对重载时, 式(9)中的“±”取负, 表示与馈线  $i$  相连的端口发出功率, 相当于减小了馈线  $i$  的负载。通过上述调控策略可实现配电网正常运行时的馈线负荷均衡, 该策略适用于 2 条及以上馈线负荷均衡调控。

(2)  $N-1$  故障时的负荷均衡调控。

当发生  $N-1$  故障时, 在保证故障馈线负载供电可靠性的同时, 通过 SNOP 潮流调控使非故障馈线负荷均衡, 假设馈线 2 发生故障, 系统示意图见图 4,

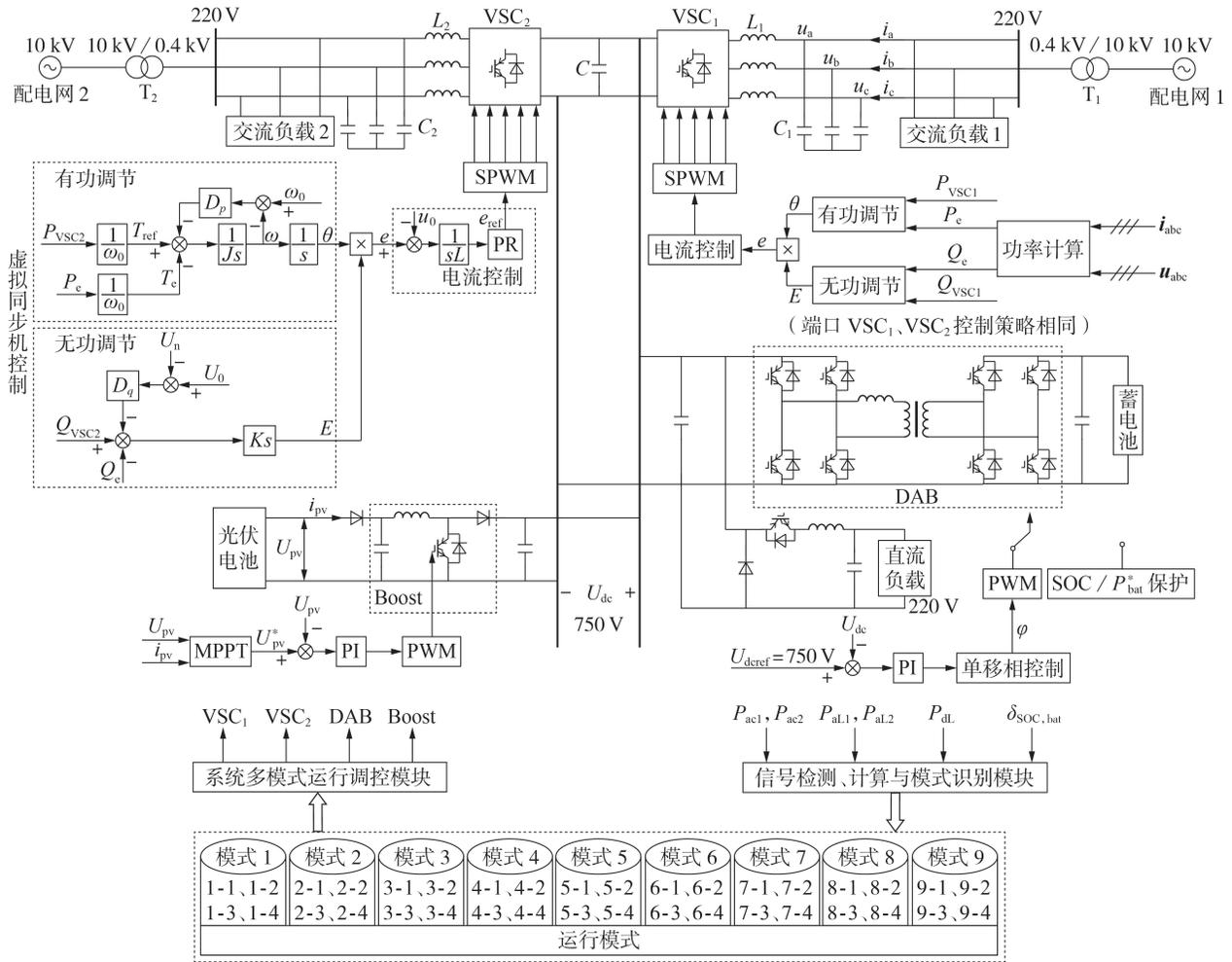


图2 柔性互联系统总体调控策略

Fig.2 Overall control strategy of flexible interconnected system

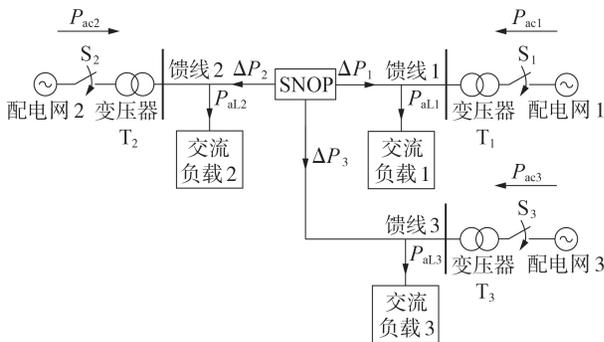


图3 系统正常运行时的示意图

Fig.3 Schematic diagram of system in normal operation

具体调控如下：

$$\begin{cases} P_{acj} = 0 \\ P_{VSCi} = P_{alj} \\ P_{acj} = P_{alj} + P_{VSCj} \\ P_{VSCj} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n P_{alj} - P_{alj} \end{cases} \quad (10)$$

当馈线*i*发生故障时，为保持*N-1*供电，故障馈线负载全部由非故障馈线供带，且非故障馈线负荷

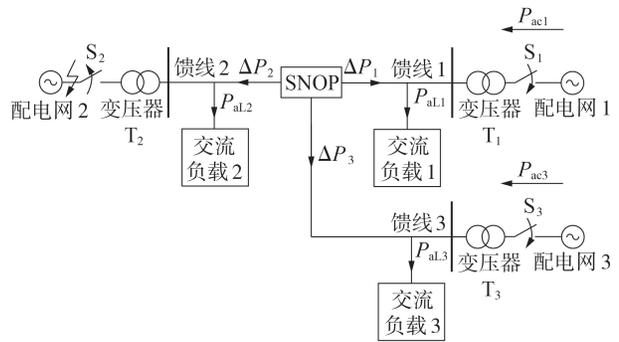


图4 系统发生*N-1*故障时的示意图

Fig.4 Schematic diagram of system in *N-1* fault operation

需均衡，即满足式(10)。通过上述调控策略可实现配电网发生*N-1*故障时的馈线负荷均衡，该策略适用于3条及以上馈线负荷均衡调控。

### 3.3 重载调控策略

针对系统多模式运行可能出现主变重载问题，为保持系统经济运行，需要对重载主变进行潮流调控使其退出重载。为此，下面提出某一主变*T<sub>i</sub>*重载时的调控策略。

(1) 柔性互联运行模式。

a. 当  $P_{net1} \geq 0$  即系统临界功率冗余时, 有:

$$P_{VSCi} = \begin{cases} P_{aLi} - 0.8 S_T & \delta_{SOC, bat} < \delta_{SOC, min} \\ (P_{aLi} - P_{aLj} + P_{pv} - P_{dl})/2 & \delta_{SOC, bat} \geq \delta_{SOC, min} \end{cases} \quad (11)$$

b. 当  $P_{net1} < 0$  即系统临界功率缺额时, 有:

$$P_{VSCi} = P_{aLi} - 0.8 S_T \quad (12)$$

(2) 负荷转供运行模式。

a. 当  $P_{net2} \geq 0$  即系统临界功率冗余时, 有:

$$P_{VSCi} = \begin{cases} P_{aLi} - 0.8 S_T & \delta_{SOC, bat} < \delta_{SOC, min} \\ P_{pv} - P_{aLj} - P_{dl} & \delta_{SOC, bat} \geq \delta_{SOC, min} \end{cases} \quad (13)$$

b. 当  $P_{net2} < 0$  即系统临界功率缺额时, 有:

$$P_{VSCi} = P_{aLi} - 0.8 S_T \quad (14)$$

需要说明的是, 当主变重载时将根据相应系统临界功率和蓄电池 SOC 进行调控, 必要时需要根据负荷重要程度执行切负荷操作。

由于不同时刻配电网运行和馈线负载状态不同, 同一运行模式下系统临界功率可能冗余或缺额, 加之受蓄电池 SOC 影响, 因此系统在某一运行模式下仍然存在多种运行模式, 而模式不同将会影响 SNOP 端口控制指令。为实现系统在多模式运行下的自由切换, 本文对系统具体运行模式进行了详细分析及分类, 见附录 C, 并给出了不同运行模式间切换流程图, 如附录 C 中图 C1 所示。

综上, 为实现系统在多模式运行下的稳定与自由切换的同时, 实现馈线负荷均衡和重载主变自动调控, 并且无需进行控制策略切换, 图 C1 给出了系统总体调控策略。具体调控过程为: 通过信号检测获取馈线功率、负荷功率、光伏出力及蓄电池 SOC 等信号; 根据模式识别确定系统的具体工作模式; 根据多模式运行调控策略计算 SNOP 端口 VSC<sub>1</sub>、VSC<sub>2</sub> 有功功率参考值  $P_{VSC1}$ 、 $P_{VSC2}$ , 进而得到相应的控制信号。

#### 4 仿真验证与分析

为验证所提调控策略的合理性和有效性, 搭建系统的 MATLAB / Simulink 仿真模型, 对模式①—③这 3 类运行模式下的典型模式进行仿真。主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
参数	数值
配电网 1、2 电压	10 kV
直流母线电压	750 V
变压器 T <sub>1</sub> 、T <sub>2</sub> 额定容量	100 kV·A
变换器 VSC <sub>1</sub> 、VSC <sub>2</sub> 额定功率	50 kW
Boost 变换器额定功率	30 kW
DAB 变换器额定功率	20 kW
直流负荷	5 kW
光伏出力	25 kW

##### 4.1 柔性互联运行模式仿真

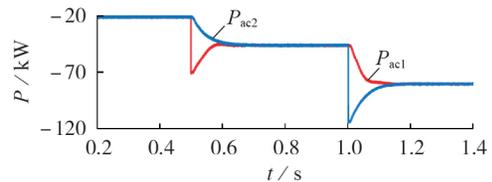
设  $P_{pv} = 25$  kW, [0.2, 0.5) s 时,  $P_{aL1} = 40$  kW,  $P_{aL2} =$

20 kW, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 正常带载; [0.5, 1.0) s 时,  $P_{aL1}$  增加 50 kW 变为 90 kW, T<sub>1</sub> 重载, T<sub>2</sub> 正常带载; [1.0, 1.5) s 时,  $P_{aL2}$  增加 70 kW 变为 90 kW, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 均重载。各单元功率变化情况如表 2 所示, 仿真结果见图 5。不同运行模式下的 SNOP 端口电压见附录 D 中图 D1。

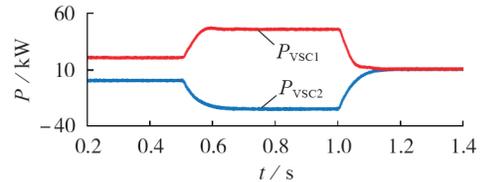
表 2 柔性互联运行模式下的各单元功率变化

Table 2 Power variation of units under flexible interconnection operating mode

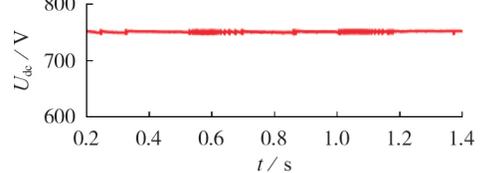
功率 / 变压器状态	功率 / kW		
	[0.2, 0.5) s	[0.5, 1.0) s	[1.0, 1.5) s
$P_{aL1}$	40	90	90
$P_{aL2}$	20	20	90
$P_{VSC1}$	20	45	10
$P_{VSC2}$	0	-25	10
$P_{ac1}$	-20	-45	-80
$P_{ac2}$	-20	-45	-80



(a) 配电网输出功率



(b) SNOP 端口功率



(c) 直流母线电压

图 5 柔性互联运行模式下的仿真结果

Fig.5 Simulative results under flexible interconnection operating mode

[0.2, 0.5) s 时, 系统工作于模式 1, 光伏供带直流负荷后剩余功率 20 kW, 而交流总负荷为 60 kW, 所以  $P_{aL1}$  需转移 20 kW 由 VSC<sub>1</sub> 供带。由图 5(a)、(b) 可见,  $P_{VSC1} = 20$  kW,  $P_{ac1} = P_{ac2} = -20$  kW, 实现了负荷均衡。[0.5, 1.0) s 时, 系统由模式 1 切换至模式 3, 实际交流总负荷变为 90 kW, T<sub>1</sub> 重载, 需转移  $P_{aL1}$  部分负荷。由图 5(a)、(b) 可见,  $P_{ac1} = P_{ac2} = -45$  kW,  $P_{VSC1} = 45$  kW,  $P_{VSC2} = -25$  kW, 不仅实现了负荷均衡, 而且使 T<sub>1</sub> 退出了重载。[1.0, 1.5) s 时, 系统由模式 3 切换至模式 4, 实际交流总负荷为 160 kW, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 均重载,  $P_{net1} = 0$ , 保证了功率平衡, 仅需转移  $P_{aL1}$ 、 $P_{aL2}$  部分负荷。由图 5(a)、(b) 可知,  $P_{ac1} = P_{ac2} = -80$  kW,

$P_{VSC1}=P_{VSC2}=10\text{ kW}$ , 不仅实现了负荷均衡, 而且能使  $T_1$ 、 $T_2$  退出重载。[0.2, 1.5] s 期间, 系统在多模式运行与切换时, 由图 5(c) 和附录 D 中图 D1(a) 可知, 直流母线电压  $U_{dc}$  始终稳定在 750 V, SNOP 端口电压正常。

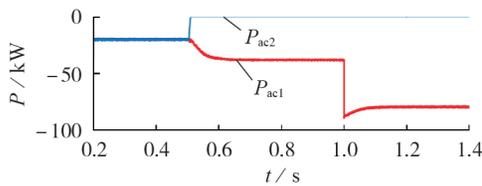
#### 4.2 负荷转供运行模式仿真

设 [0.2, 0.5) s 时, 系统仍工作于模式 1, 分析同 4.1 节, 不再赘述; [0.5, 1.0) s 时,  $T_1$  正常带载,  $T_2$  停运; [1.0, 1.5] s 时,  $P_{al1}$  增加 50 kW 变为 90 kW,  $T_1$  重载,  $T_2$  停运。系统各单元功率变化情况如表 3 所示, 仿真结果见图 6。

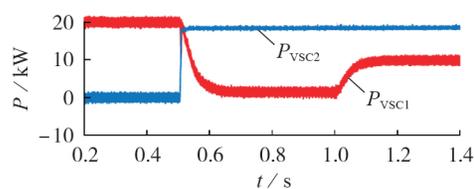
表 3 负荷转供运行模式下的各单元功率变化

Table 3 Power variation of units under load transfer operating mode

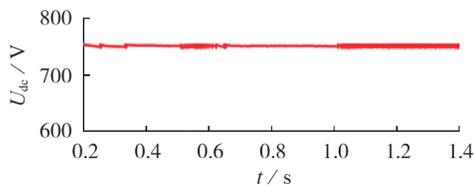
功率 / 变压器状态	功率 / kW		
	[0.2, 0.5) s	[0.5, 1.0) s	[1.0, 1.5] s
$P_{al1}$	40	40	90
$P_{al2}$	20	20	20
$P_{VSC1}$	20	0	10
$P_{VSC2}$	0	20	20
$P_{ac1}$	-20	-40	-80
$P_{ac2}$	-20	0(故障)	0(故障)



(a) 配电网输出功率



(b) SNOP 端口功率



(c) 直流母线电压

图 6 负荷转供运行模式下的仿真结果

Fig.6 Simulative results under load transfer operating mode

[0.5, 1.0) s 时, 系统由模式 1 切换至模式 5,  $T_2$  停运。由图 6(a) 可见,  $P_{ac1}=-40\text{ kW}$ ,  $P_{ac2}=0$ , 为保障故障馈线负载供电可靠性,  $P_{al2}$  需全部转移由  $VSC_2$  供带; 由图 6(b) 可见,  $P_{VSC1}=0$ ,  $P_{VSC2}=20\text{ kW}$ , 实现了负荷转供。[1.0, 1.5] s 时, 系统由模式 5 切换至模式 6, 实际交流总负荷为 90 kW,  $T_1$  重载, 需要调控端

口  $VSC_1$  的功率指令进行负荷转移。由图 6(b) 可知, 不仅实现了负荷转供, 而且使  $T_1$  退出重载保持临界状态运行。[0.2, 1.5] s 期间, 系统在多模式运行与切换时, 由图 6(c) 和附录 D 中图 D1(b)、(c) 可知,  $U_{dc}$  始终稳定在 750 V, 端口  $VSC_1$  电压正常, 端口  $VSC_2$  电压在允许范围内保持稳定(跌落不足 3%)。

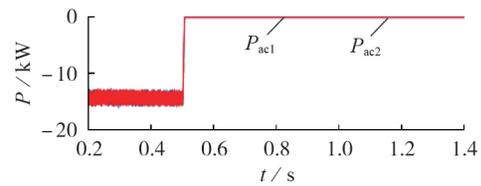
#### 4.3 孤岛运行模式仿真

设 [0.2, 0.5) s 时,  $P_{al1}=30\text{ kW}$ ,  $P_{al2}=20\text{ kW}$ ,  $T_1$ 、 $T_2$  正常带载; [0.5, 1.5] s 时,  $T_1$ 、 $T_2$  停运。系统各单元功率变化情况如表 4 所示, 仿真结果见图 7。

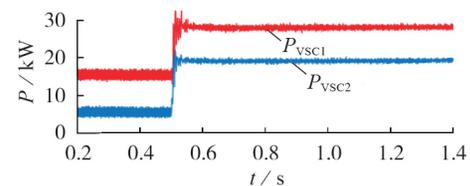
表 4 孤岛运行模式下的各单元功率变化

Table 4 Power variation of units under islanded operating mode

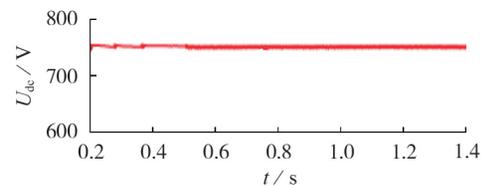
功率 / 变压器状态	功率 / kW	
	[0.2, 0.5) s	[0.5, 1.5] s
$P_{al1}$	30	30
$P_{al2}$	20	20
$P_{VSC1}$	15	30
$P_{VSC2}$	5	20
$P_{ac1}$	-15	0(故障)
$P_{ac2}$	-15	0(故障)



(a) 配电网输出功率



(b) SNOP 端口功率



(c) 直流母线电压

图 7 孤岛运行模式仿真结果

Fig.7 Simulative results under islanded operating mode

[0.2, 0.5) s 时, 系统工作于模式 1, 分析同 4.1 节, 不再赘述。[0.5, 1.5] s 时, 系统由模式 1 切换至模式 9, 故障馈线所带负载 50 kW 需由光伏和蓄电池通过 SNOP 进行短时供带。由图 7(a)、(b) 可知,  $P_{ac1}=P_{ac2}=0$ ,  $P_{VSC1}=30\text{ kW}$ ,  $P_{VSC2}=20\text{ kW}$ , 二者之和为 50 kW, 实现了孤岛模式下对重要负荷的应急供电。[0.2, 1.5] s 期间, 系统在多模式运行与切换时, 由图 7(c) 和附录 D 中图 D1(d) 可知,  $U_{dc}$  始终稳定在 750 V,

端口 VSC<sub>1</sub>、VSC<sub>2</sub> 电压在允许范围内保持稳定(跌落不足 3%),实现了孤岛模式下对故障负荷的短时应急供电,有效提升了配电网供电可靠性。

综上分析可得:本文所提调控策略不仅能实现系统多模式稳定运行与自由切换,而且能够实现负荷均衡和重载主变自动调控,有效提升了配电网供电可靠性。为验证虚拟同步机技术的优越性,本文还将其与传统定直流电压定有功功率控制进行了仿真比较,仿真结果见附录 E。

## 5 结论

针对基于储能型 SNOP 的配电网柔性互联系统存在的多模式运行与切换、馈线负荷不均衡和主变重载问题,本文提出基于虚拟同步技术的负荷均衡和重载主变自动调控策略,仿真验证了所提调控策略的合理性与有效性。结论如下:

(1)相比现有调控策略适用模式单一、需要切换控制策略的不足,所提调控策略能使系统在多模式间稳定运行与自由切换,实现了馈线负荷均衡,且无需进行控制策略切换,有效提升了配电网供电可靠性;

(2)所提重载主变自动调控策略能使系统在多模式运行与切换时发生重载的主变自动退出重载,有效提升了配电网供电安全性和经济性。

本文仅从理论和设备层面对系统多模式运行及其调控策略的合理性和有效性进行论证,在实用化方面还有诸多问题亟待解决,下一步将在蓄电池 SOC 估算方法及其与 SNOP 的协同控制、故障保护控制、系统优化降损等方面展开深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 王守相,张齐,王瀚,等.高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J].电力自动化设备,2018,38(12):33-38,52.  
WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [2] 段青,盛万兴,孟晓丽,等.面向能源互联网的新型能源子网系统研究[J].中国电机工程学报,2016,36(2):388-398.  
DUAN Qing, SHENG Wanxing, MENG Xiaoli, et al. Research of energy sub grid for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 388-398.
- [3] 徐成,梁睿,程真何,等.面向能源互联网的智能配电网安全态势感知[J].电力自动化设备,2016,36(6):13-18.  
XU Cheng, LIANG Rui, CHENG Zhenhe, et al. Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 13-18.
- [4] 李江华.浅析 10 kV 配网合环产生环流的原因及预防措施[J].电网技术,2006,30(增刊 1):199-201.  
LI Jianghua. Simple analysis of the reason and protective step of 10 kV distribution network causing circumfluence[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement 1): 199-201.
- [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 Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, 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.
- [6] 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 Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [7] 董旭柱,刘志文,李鹏,等.基于多端柔性多状态开关的智能配电网调控技术[J].中国电机工程学报,2018,38(增刊 1):86-92.  
DONG Xuzhu, LIU Zhiwen, LI Peng, et al. Intelligent distribution network control technology based on multi-terminal flexible distribution switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1): 86-92.
- [8] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [9] 贾冠龙,陈敏,赵斌,等.柔性多状态开关在智能配电网中的应用[J].电工技术学报,2019,34(8):1760-1768.  
JIA Guanlong, CHEN Min, ZHAO Bin, et al. Application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1760-1768.
- [10] 胡玉,顾杰,马睿,等.面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J].电力自动化设备,2019,39(11):85-91.  
HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 85-91.
- [11] 姚宗强,赵长伟,马世乾,等.含多端 SOP 的智能配电网运行优化及示范应用[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(12):66-72.  
YAO Zongqiang, ZHAO Changwei, MA Shiqian, et al. Operation and optimization of smart distribution network with multi-terminal soft open point and pilot application[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 66-72.
- [12] HAN C, SONG S, YOO Y, et al. Optimal operation of soft-open points for high penetrated distributed generations on distribution networks[C]//2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia(ICPE 2019-ECCE Asia). Busan, South Korea: IEEE, 2019: 806-812.
- [13] SHAFIK M B, CHEN H, RASHED G I, et al. Adequate topology for efficient energy resources utilization of active distribution networks equipped with soft open points[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99003-99016.
- [14] 霍群海,栗梦涵,吴理心,等.柔性多状态开关新型复合控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(7):166-170.  
HUO Qunhai, SU Menghan, WU Lixin, et al. Compound control strategy for flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 166-170.
- [15] 张国荣,沈聪,彭勃,等.馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J].高电压技术,2019,45(10):3050-3059.  
ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multi-state switch in the case of feeder fault[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3050-3059.
- [16] LOU C, YANG J. Adaptive service restoration strategy of dis-

- tribution networks with distributed energy resources and soft open points[C]//2019 25th International Conference on Electricity Distribution. Madrid, Spain: CIRED, 2019:395-400.
- [17] 尹璐, 易姝娴, 张凯, 等. 基于柔性环网控制装置的10 kV配电网运行方式[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1):137-142.  
YIN Lu, YI Shuxian, ZHANG Kai, et al. Operation mode of 10 kV distribution network with flexible looped network controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 137-142.
- [18] 张国荣, 彭勃, 解润生, 等. 柔性多状态开关模型预测协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20):123-129.  
ZHANG Guorong, PENG Bo, XIE Runsheng, et al. Predictive synergy control strategy for flexible multi-state switch model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 123-129.
- [19] 蔡云旖, 屈子森, 杨欢, 等. 柔性多状态开关改进型下垂控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7):2488-2497.  
CAI Yunyi, QU Zisen, YANG Huan, et al. Research on improved droop control strategy for soft open point[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2488-2497.
- [20] XU C, YUAN X, XU Y, et al. Research on feeder power balancing technology based on SNOP droop control[C]//2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Xi'an, China: IEEE, 2019:192-196.
- [21] 张宸宇, 缪惠宇, 史明明, 等. 一种基于虚拟同步机的背靠背系统控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19):107-113.  
ZHANG Chenyu, MIAO Huiyu, SHI Mingming, et al. A back-to-back system control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19):107-113.
- [22] WU R, RAN L, WEISS G, et al. Control of a synchronverter-based soft open point in a distribution network[J]. The Journal of Engineering, 2019(16):720-727.
- [23] YAO C, ZHOU C, YU J, et al. A sequential optimization method for soft open point integrated with energy storage in active distribution networks[J]. Energy Procedia, 2018, 145:528-533.
- [24] ATTANASIO F, WASTERLAIN S, PIDANCIER T, et al. Low voltage soft open point with energy storage: system simulation and prototype preliminary test results[C]//2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Largo Cesare, Italy: IEEE, 2018:254-261.
- [25] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1259-1267.
- [26] KIM Y S, KIM E S, MOON S I. Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):718-728.

#### 作者简介:



段青

段青(1974—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士后,主要研究方向为配电网运行控制技术、电力电子技术、柔性配电技术等(**E-mail**:duanqing@epri.sgcc.com.cn);

沙广林(1988—),男,辽宁本溪人,高级工程师,博士,通信作者,主要研究方向为电力电子拓扑设计与控制优化、电力电子化柔性配电技术等(**E-mail**:shaguanglin@epri.sgcc.com.cn);

盛万兴(1965—),男,河南信阳人,教授级高级工程师,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网电力系统自动化及电网经济运行(**E-mail**:wxsheng@epri.sgcc.com.cn);

杨万里(1988—),男,河南信阳人,博士研究生,主要研究方向为电力电子化柔性配电技术(**E-mail**:yangwanli542@foxmail.com)。

(编辑 李玮)

## Multi-mode operation and its control strategy of flexible interconnected system for distribution network

DUAN Qing<sup>1</sup>, SHA Guanglin<sup>1</sup>, SHENG Wanxing<sup>1</sup>, YANG Wanli<sup>2</sup>, WANG Zhikai<sup>2</sup>, FU Lumin<sup>3</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Distribution Transformer Energy-saving Technology, China Electric Power

Research Institute, Beijing 100192, China; 2. National Electric Power Conversion and

Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China;

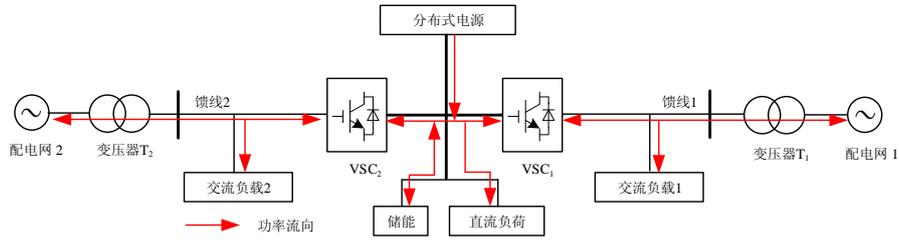
3. State Grid Shanghai Pudong Electric Power Supply Company, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Flexible interconnected system for distribution network based on SNOP (Soft Normally-Open Point) might have issues including multi-mode operation and switching, unbalanced feeder load and main transformer overload. To address these issues, a load balancing regulation strategy and automatic regulation strategy of main transformer overload based on virtual synchronous machine technology are proposed. Firstly, the operation mode of system is divided according to the load condition of feeder and main transformer. Subsequently, through the analysis on balance relationship of power transmission and switching logic of different operating modes, the active power regulation instructions of SNOP under multi-mode operations are obtained according to respective control strategies. As a result, the multi-mode stable operation and free switching of the system are realized. At the same time, the feeder load balancing and overload automatic regulation of main transformer are realized, in which the control strategy switching is not required.

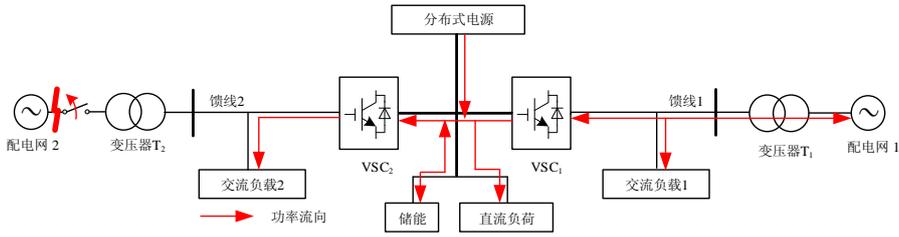
**Key words:** distribution network; flexible interconnection; virtual synchronous generator; SNOP; unbalanced load; main transformer overload

# 附录

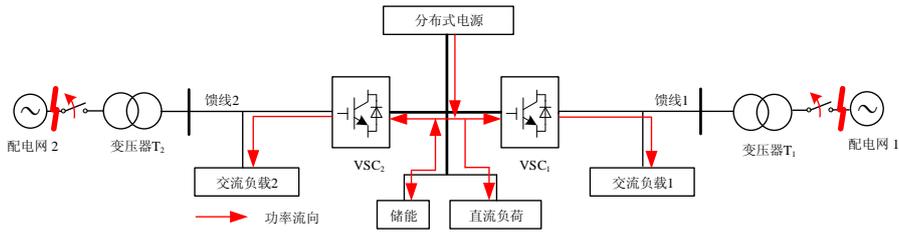
## 附录 A



(a) 柔性互联运行模式



(b) 负荷转供运行模式



(c) 孤岛运行模式

图 A1 系统 3 类运行模式

Fig.A1 Flexible interconnected system three types of operation mode

# 附录 B

表 B1 运行模式

Table B1 Operational mode

模式	交流端口 1	交流端口 2	T <sub>1</sub> 状态	T <sub>2</sub> 状态
模式 1	并网	并网	正常	正常
模式 2	并网	并网	正常	重载
模式 3	并网	并网	重载	正常
模式 4	并网	并网	重载	重载
模式 5	并网	离网	正常	故障
模式 6	并网	离网	重载	故障
模式 7	离网	并网	故障	正常
模式 8	离网	并网	故障	重载
模式 9	离网	离网	故障	故障

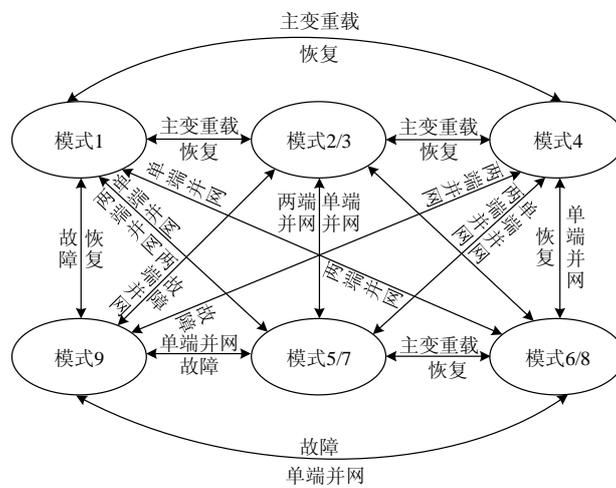


图 B1 运行模式切换

Fig.B1 Operational mode switching

## 附录 C

注：模式 1-9 中不同模式间可能存在表达式完全一样的情况，但由于临界功率缺额且蓄电池  $SOC_{bat} < SOC_{min}$  时，需要切除部分负荷，因此，式中  $P_{aL1}$ 、 $P_{aL2}$ 、 $P_{dL}$  虽然形式相同但数值可能不等。

**模式 1：**配电网 1、2 的馈线功率与交流负荷 1、2 的功率满足： $P_{ac1} \neq 0$ ， $P_{ac2} \neq 0$ ， $P_{aL1} \leq 0.8S_T$ ， $P_{aL2} \leq 0.8S_T$ 。

(1) 模式 1-1： $P_{net1} \geq 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C1)$$

(2) 模式 1-2： $P_{net1} \geq 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = \frac{P_{aL1} - P_{aL2} + P_{pv} - P_{dL}}{2} \\ P_{VSC2} = \frac{P_{aL2} - P_{aL1} + P_{pv} - P_{dL}}{2} \end{cases} \quad (C2)$$

(3) 模式 1-3： $P_{net1} < 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C3)$$

(4) 模式 1-4： $P_{net1} < 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C4)$$

**模式 2：**配电网 1、2 的馈线功率与交流负荷 1、2 的功率满足： $P_{ac1} \neq 0$ ， $P_{ac2} \neq 0$ ， $P_{aL1} \leq 0.8S_T$ ， $P_{aL2} \leq 0.8S_T$ 。

(1) 模式 2-1： $P_{net1} \geq 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C5)$$

(2) 模式 2-2： $P_{net1} \geq 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = \frac{P_{aL1} - P_{aL2} + P_{pv} - P_{dL}}{2} \\ P_{VSC2} = \frac{P_{aL2} - P_{aL1} + P_{pv} - P_{dL}}{2} \end{cases} \quad (C6)$$

(3) 模式 2-3： $P_{net1} < 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C7)$$

(4) 模式 2-4： $P_{net1} < 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C8)$$

**模式 3：**配电网 1 和 2 的馈线功率与交流负荷 1 和 2 的功率满足： $P_{ac1} \neq 0$ ， $P_{ac2} \neq 0$ ， $P_{aL1} > 0.8S_T$ ， $P_{aL2} \leq 0.8S_T$ 。该模式下 4 种工况与模式 2 类似，在此不再赘述。

**模式 4：**配电网 1 和 2 的馈线功率与交流负荷 1 和 2 的功率满足： $P_{ac1} \neq 0$ ， $P_{ac2} \neq 0$ ， $P_{aL1} > 0.8S_T$ ， $P_{aL2} > 0.8S_T$ 。

(1) 模式 4-1： $P_{net1} \geq 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C9)$$

(2) 模式 4-2： $P_{net1} \geq 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = \frac{P_{aL1} - P_{aL2} + P_{pv} - P_{dL}}{2} \\ P_{VSC2} = \frac{P_{aL2} - P_{aL1} + P_{pv} - P_{dL}}{2} \end{cases} \quad (C10)$$

(3) 模式 4-3:  $P_{net1} < 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C11)$$

(4) 模式 4-4:  $P_{net1} < 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} - 0.8S_T \end{cases} \quad (C12)$$

**模式 5:** 配电网 1 和 2 的馈线功率与交流负荷 1 和 2 的功率满足:  $P_{ac1} \neq 0$ ,  $P_{ac2} = 0$ ,  $P_{aL1} \leq 0.8S_T$ 。

(1) 模式 5-1:  $P_{net2} \geq 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C13)$$

(2) 模式 5-2:  $P_{net2} \geq 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{pv} - P_{aL2} - P_{dL} \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C14)$$

(3) 模式 5-3:  $P_{net2} < 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C15)$$

(4) 模式 5-4:  $P_{net2} < 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C16)$$

**模式 6:** 配电网 1 和 2 的馈线功率与交流负荷 1 和 2 的功率满足:  $P_{ac1} \neq 0$ ,  $P_{ac2} = 0$ ,  $P_{aL1} > 0.8S_T$ 。

(1) 模式 6-1:  $P_{net2} \geq 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C17)$$

(2) 模式 6-2:  $P_{net2} \geq 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{pv} - P_{aL2} - P_{dL} \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C18)$$

(3) 模式 6-3:  $P_{net2} < 0$  且  $SOC_{bat} < SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C19)$$

(4) 模式 6-4:  $P_{net2} < 0$  且  $SOC_{bat} \geq SOC_{min}$ 。此时有:

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} - 0.8S_T \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C20)$$

**模式 7:** 配电网 1 和 2 的馈线功率与交流负荷 1 和 2 的功率满足:  $P_{ac1} = 0$ ,  $P_{ac2} \neq 0$ ,  $P_{aL2} \leq 0.8S_T$ 。该模式下

4种工况与模式5类似，在此不再赘述。

**模式8：** 配电网1和2的馈线功率与交流负荷1和2的功率满足： $P_{ac1}=0, P_{ac2}\neq 0, P_{aL2}>0.8S_T$ 。该模式下4种工况与模式6类似，在此不再赘述。

**模式9：** 配电网1和2的馈线功率与交流负荷1和2的功率满足： $P_{ac1}=0, P_{ac2}=0$ 。

(1) 模式9-1： $P_{net3}\geq 0$ 且 $SOC_{bat}<SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C21)$$

(2) 模式9-2： $P_{net3}\geq 0$ 且 $SOC_{bat}\geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C22)$$

(3) 模式9-3： $P_{net3}< 0$ 且 $SOC_{bat}<SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C23)$$

(4) 模式9-4： $P_{net3}< 0$ 且 $SOC_{bat}\geq SOC_{min}$ 。此时有：

$$\begin{cases} P_{VSC1} = P_{aL1} \\ P_{VSC2} = P_{aL2} \end{cases} \quad (C24)$$

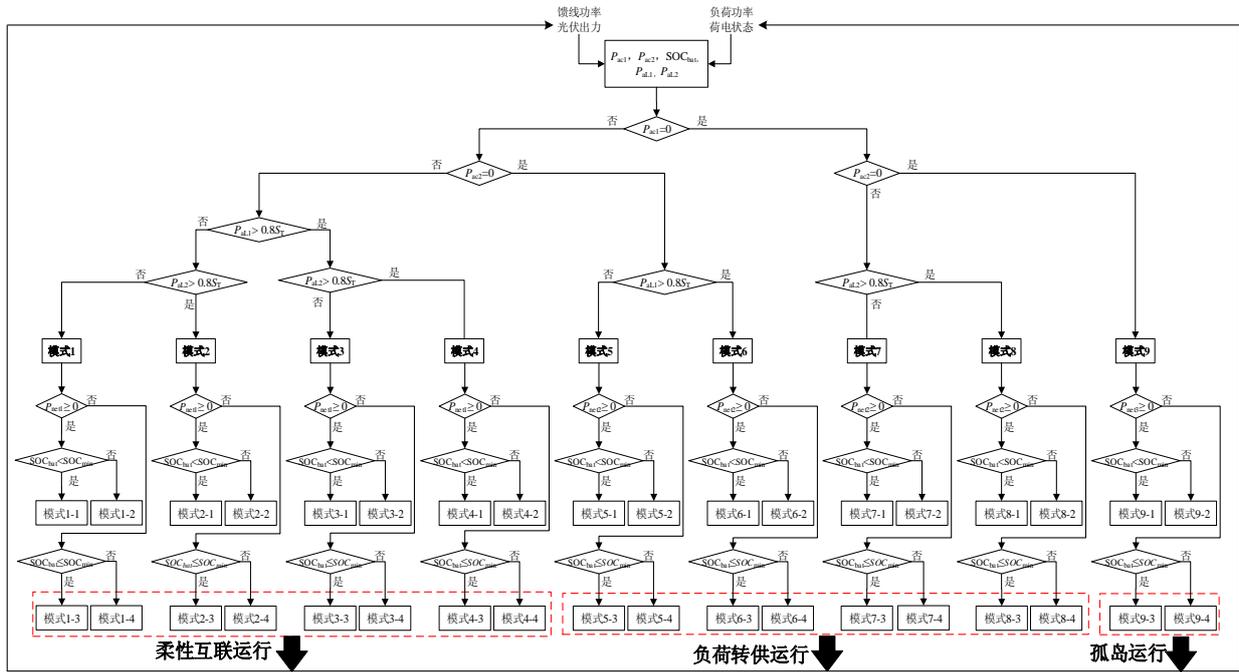
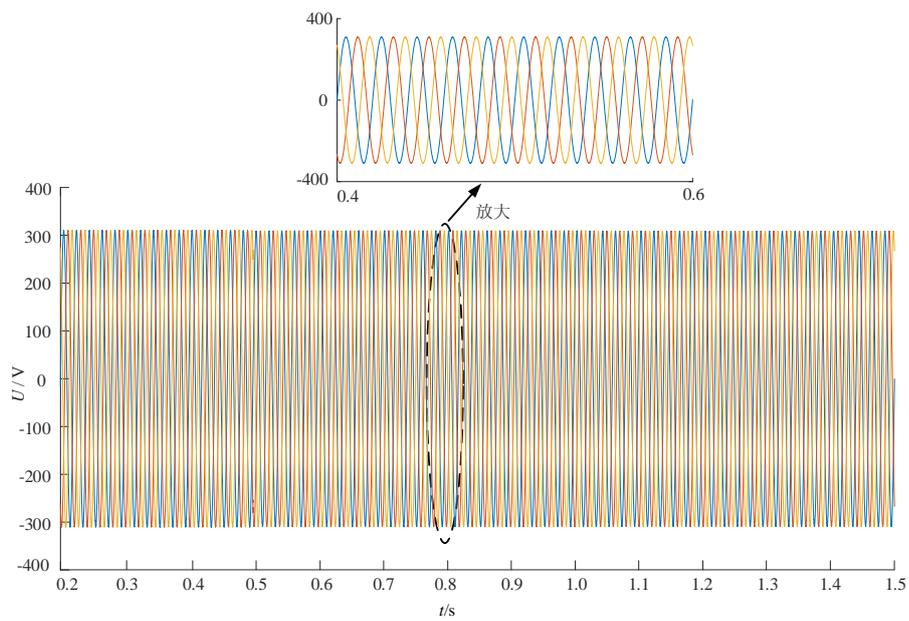


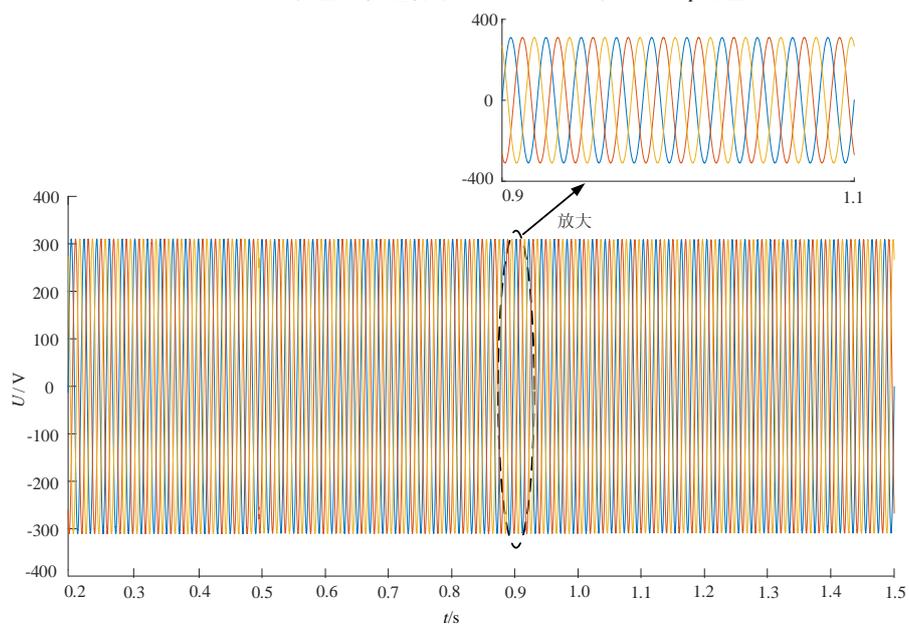
图 C1 柔性互联系统不同运行模式切换流程图

Fig.C1 Flowchart of different operation modes switching of flexible interconnected system

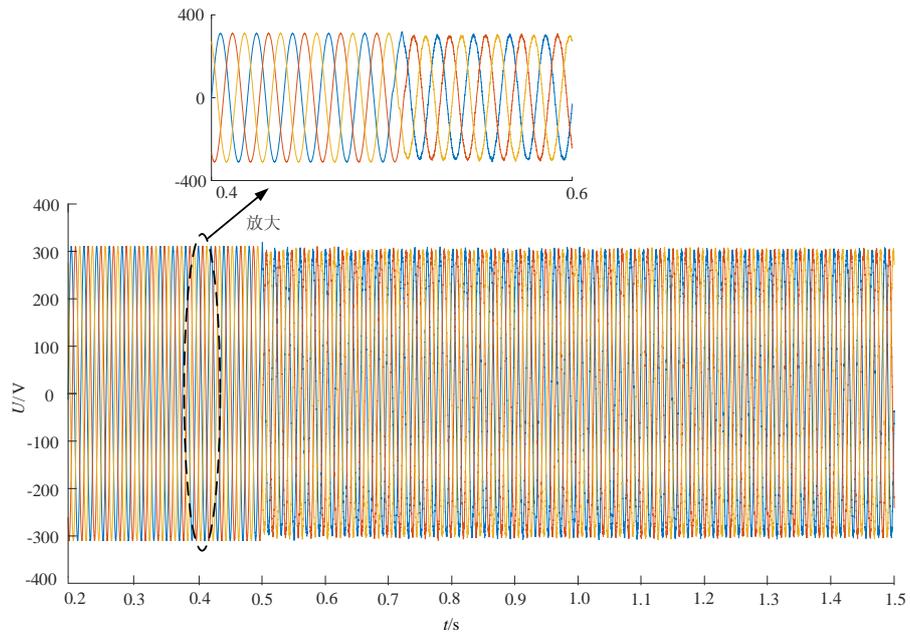
## 附录 D



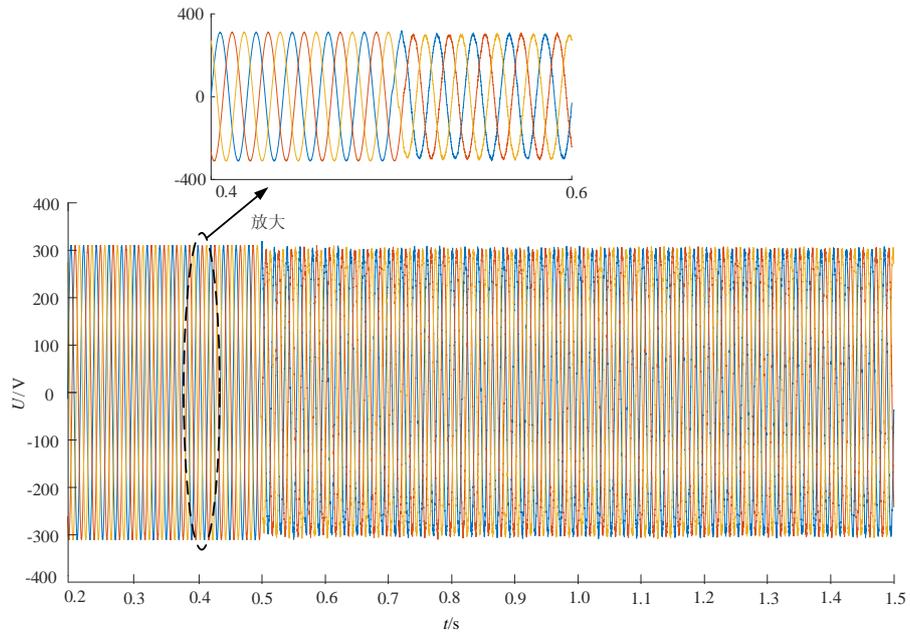
(a) 柔性互联运行模式下 SNOP 端口 VSC<sub>1</sub> 电压



(b) 负荷转供运行模式下端口 VSC<sub>1</sub> 电压



(c) 负荷转供运行模式下端口 VSC<sub>2</sub> 电压



(d) 孤岛运行模式下 SNOP 端口 VSC<sub>1</sub>、VSC<sub>2</sub> 电压

图 D1 不同运行模式下的 SNOP 端口电压

Fig.D1 SNOP port voltages in different operating modes

## 附录 E

(1)电网频率波动。在 0.6s 时电网频率跌落 0.22Hz, 0.02s 后扰动消除, 经短暂波动后频率恢复额定值, 如图 E1 所示为 2 种控制策略下 SNOP 端口有功功率变化。

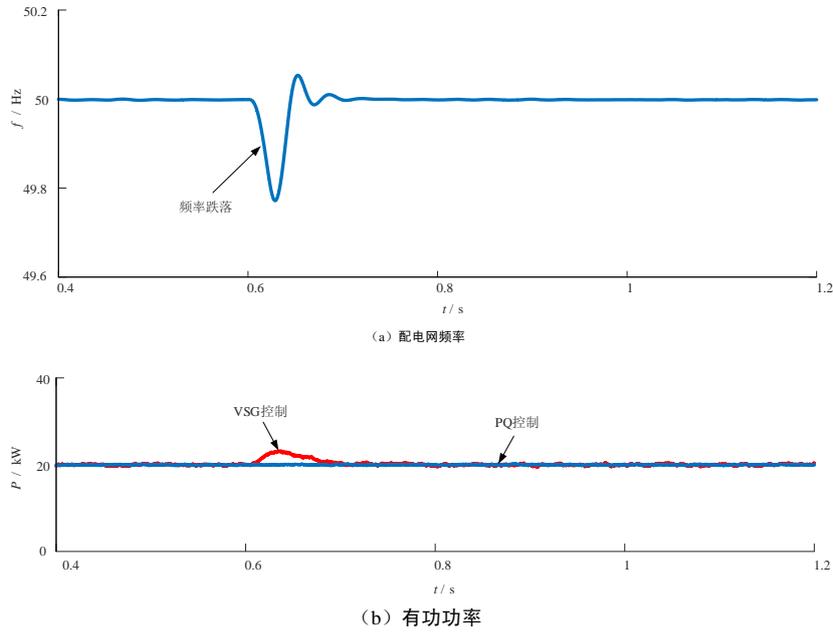


图 E1 配电网频率与 SNOP 端口有功功率

Fig.E1 Distribution frequency and SNOP port active power

(2)电网电压波动。0.8s 时将电网电压幅值上升 10%, 1.2s 时将电压恢复, 电网电压波动过程中, 两种控制策略下 SNOP 交流端口无功功率如图 E2 所示。

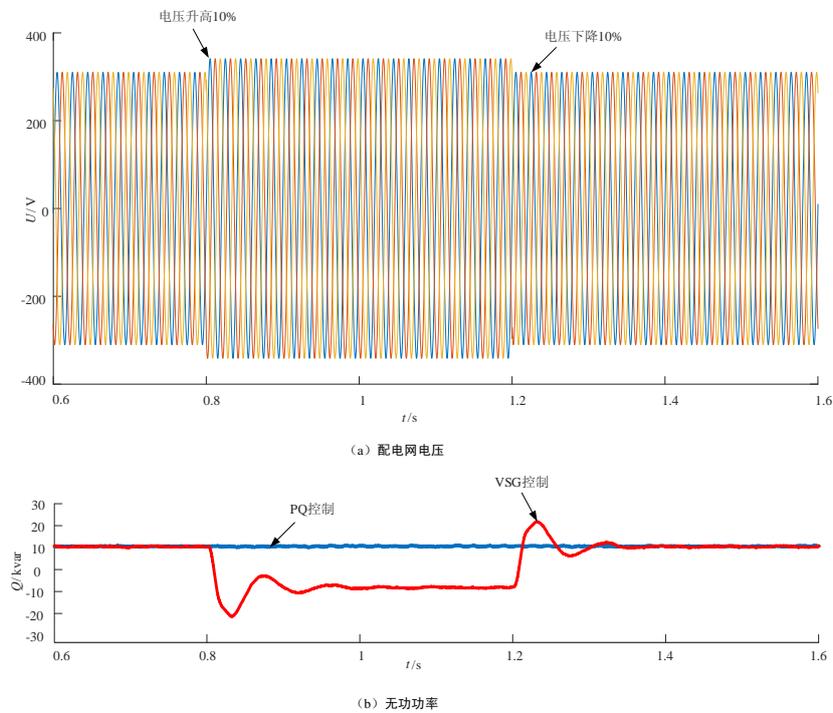


图 E2 配电网电压与 SNOP 端口无功功率

Fig.E2 Distribution voltage and SNOP port reactive power