

新型能源子网的运行场景及控制策略研究

程红¹, 张岚¹, 沙广林², 徐晓贤³, 刘璿琪¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

3. 国家电网淮南供电公司, 安徽 淮南 232001)

摘要:以一种双端并网新型能源子网为研究对象,该能源子网以电力集能器为核心,由光伏发电、储能装置、交直流负荷等单元构成。通过分析能源子网各组成单元的潮流流动情况,归纳了能源子网的多物理运行场景,并对其进行详细地分类分析;根据能源子网总体控制目标,研究了各种运行场景下的控制策略,设计了运行场景的切换原则;最后在Matlab平台上搭建了新型能源子网的仿真模型。经分析,该能源子网能够在多种物理场景下稳定运行,验证了上述控制策略的可行性和有效性。

关键词:能源子网;运行场景;控制策略;切换原则

中图分类号:TM727 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19305

Study on the Operation Scenes and Control Strategy Based on Energy Sub Grid

CHENG Hong¹, ZHANG Lan¹, SHA Guanglin², XU Xiaoxian³, LIU Jinqi¹

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing),

Beijing 100083, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Huainan Power Supply Company, Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract: A new double-end grid-connected energy subnet was taken as the research object. The energy subnet takes the electric energy concentrator as the core and was composed of photovoltaic power generation, energy storage devices and AC-DC load cells. By analyzing the trend of flow in each unit of energy sub-network, the multi-physics operation scene of energy sub-network was listed and classified in detail. Based on the overall control objectives of energy sub-network, the control strategies in various operation scenarios were studied. Finally, the simulation model of a new energy subnet was built on the platform of Matlab. The energy subnet can be operated stably under a variety of physical scenarios, and the feasibility and effectiveness of the above control strategies were verified.

Key words: energy sub grid; operation scene; control strategy; switching principle

近几十年来,受到能源短缺、环境污染等影响,以太阳能、风能为主的节约型能源得以广泛利用,越来越多的分布式电源接入配电网。然而,当前传统配电网由于结构形态固定、集中被动控制为主、开环运行和刚性装备的限制^[1],使得配电网对分布式电源的接纳能力有限,无法满足现有需求。

为了更高效地利用可再生能源,提高配电网的稳定性,近年来的研究成果表明,交直流柔性互联配电系统更满足未来配电网的要求^[2-4],因而世界各国都已开始了对配电系统的柔性配电装备进行研究。中国电力科学研究院于2010年提出面向下一代配电网的“灵活配电系统”概念^[5],提出灵活配电装备—电力集能器和电能交换器^[6]。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51577187)

作者简介:程红(1966—),女,博士,教授,Email:chengh@cumt.edu.cn

基于电力集能器构建的新型能源子网与传统交直流微电网结构类似,但传统微电网以交流断路器为核心接入配电网的形式,并不满足更加智能、灵活、互动的未来微电网的发展趋势。新型能源子网以电力集能器为配电核心,具有集中治理、统一调配、电能双向自由交换、信息物理系统融合、潮流主动可控等功能^[7],能够提升电能质量,提高电网的自愈性。

控制系统是新型能源子网研究的关键之一。然而,能源子网相比于传统微电网,运行场景复杂多变,控制系统也较为繁琐。因此,如何使系统高效稳定运行成为了目前亟需解决的问题。一个有效的控制策略,需要通过协调系统内不同单元的运行过程,实现系统安全、经济、高效的运行^[8]。

文献[9]提出面向未来能源互联网的新型全可控柔性配电装备,即电能交换器和电力集能器为核心的能源局域网与能源子网层次化配电侧灵活配电系统架构,详细设计了电力集能器的系统结构。但没有对能源子网系统的运行场景进行系统分类分析。目前关于能源子网的方面研究较少,其结构类似于微电网,所以本文还借鉴了微电网的运行模式分析及控制策略。文献[10]针对以新能源发电为主的微网系统,分析其各运行模式,提出电压分层协调控制策略。文献[11]在分析直流微电网运行方案的基础上,提出基于系统离网运行、并网运行及离/并网切换运行3种情形的优化配置方法。但文献[10-11]分析的微电网相比于能源子网,结构简单,运行模式较为单一。

本文基于文献[9]所提出的新型能源子网系统,深入研究子网系统复杂多变的运行场景,设计了新型能源子网多种运行场景下的控制策略。最后,搭建了以电力集能器为核心的新型能源子网的仿真模型。仿真结果证明了本文提出的新型能源子网系统控制策略的可行性和有效性。

1 新型能源子网的结构与功能

考虑到重要负荷(煤矿、医院等)的双路供电问题,采用双端并网新型能源子网,其结构如图1a所示。该系统以电力集能器为配电核心,可实现光伏发电单元、储能装置、交直流负荷等单元的即插即用。电力集能器核心模块主电路拓扑如图1b所示,该电力集能器设有2个直流端口和

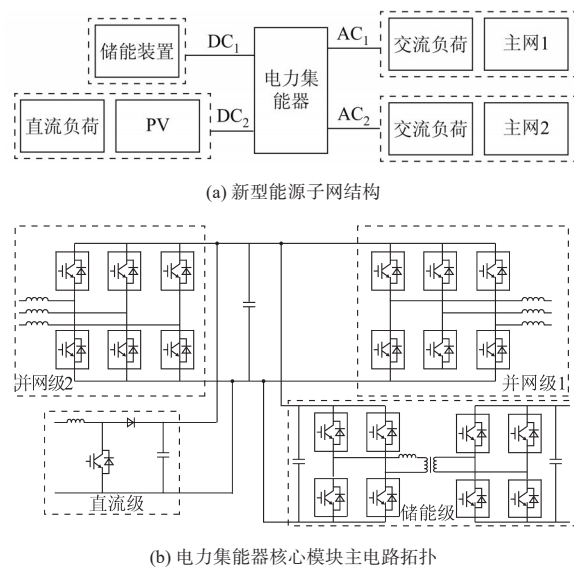


图1 新型能源子网结构及核心元件电路拓扑

Fig.1 Structure diagram of energy sub grid and topology of core component

2个交流端口。拓扑基于背靠背结构,其中逆变级、整流级及直流隔离级均采用H桥结构,选取三相工频交流电压380V,依据相应国家标准选取750V直流母线配电线路^[12]。

2 新型能源子网多物理运行场景分析

本节将对新型能源子网复杂多变的运行场景及其相互切换的情况进行详细分析。如图2所示,储能以及主网1、主网2端口具有能量双向潮流流动的使用场景,光伏、负荷具有单向潮流流动的使用场景。基于电力集能器各端口潮流流动情况,以交流主网端口的潮流流动情况为分类依据,列举出了新型能源子网的多物理运行场景,其中主要包括双端并网、单端并网及系统孤岛等运行场景,详细分类如表1所示。这里规定并网为给电网输送能量。

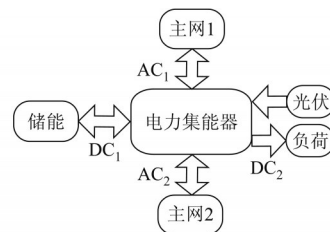


图2 电力集能器各端口潮流流动情况

Fig.2 Port energy flow of energy hub

从表1中可以看出,以各单元的潮流流动情况划分,本文研究的新型能源子网的运行场景共有32种;以交流主网1、主网2的潮流流动进行划分,新型能源子网的运行场景有6种,包括双端并

表1 新型能源子网的多物理运行场景

Tab.1 Multi-physical operation scenes of the new energy sub grid				
运行场景	主网1、主网2 端口	储能端口	PV发电 情况	
state 1	双端 并网	主网1、主	储能端吸收能量	PV发电
state 2		网2端口	储能端释放能量	PV发电
state 3		并网	储能端释放能量	PV不发电
state 4	一端 并网	主网1端	储能端吸收能量	PV发电
state 5		口并网,	储能端释放能量	PV发电
state 6		主网2端	储能端释放能量	PV不发电
state 7	一端 离网	口离网,	储能端吸收能量	PV发电
state 8		主网1端	储能端释放能量	PV发电
state 9		口并网	储能端释放能量	PV不发电
state 10	一端 离网 一端 供电	主网1离	储能端吸收能量	PV发电
state 11		网,主网2	储能端吸收能量	PV不发电
state 12		从电网吸	储能端释放能量	PV发电
state 13		收能量	储能端释放能量	PV不发电
state 14		主网1从	储能端吸收能量	PV发电
state 15		电网吸收	储能端吸收能量	PV不发电
state 16		能量,主	储能端释放能量	PV发电
state 17	网2离网	储能端释放能量	PV不发电	
state 18	一端 并网 一端 供电	主网1端	储能端吸收能量	PV发电
state 19		口并网,	储能端吸收能量	PV不发电
state 20		主网2端	储能端释放能量	PV发电
state 21		口从电网	储能端释放能量	PV不发电
state 22		吸收能量	储能端吸收能量	PV发电
state 23		主网1端	储能端吸收能量	PV不发电
state 24		口从电网	储能端释放能量	PV发电
state 25	吸收能量,	储能端释放能量	PV不发电	
state 26	主网2端	储能端吸收能量	PV发电	
state 27	双端 供电	口并网	储能端释放能量	PV不发电
state 28		主网1、主网	储能端吸收能量	PV不发电
state 29		2端口从电	储能端释放能量	PV发电
state 30	系统 孤岛	网吸收能量	储能端释放能量	PV不发电
state 31		主网1、主网	储能端吸收能量	PV发电
state 32		2端口离网	储能端释放能量	PV不发电

网、一端并网一端离网、一端离网一端供电、一端并网一端供电、双端供电以及系统孤岛。

在新型能源子网运行场景发生改变时,如交流电网并网运行、系统交流侧故障等,系统应该能够自动切换至新的运行场景下的控制方式。根据实际情况,当交流主网端口从并网运行场景切换到供电运行场景时,应先切换至离网运行场景,再切换至供电运行场景,反之亦然。

通过对新型能源子网的运行场景进行分析,我们发现,在不同的运行场景下,各单元的单一控制不能满足能源子网稳定运行的需求。因此,需要对能源子网的各单元的控制情况进行分析。

3 新型能源子网的各单元控制情况

基于对新型能源子网多物理运行场景的分析,本文将针对系统各单元不同的运行场景设计相应的控制策略,包括光伏发电端口的MPPT控制、储能端口的充、放电控制以及2个主网端口的并、离网等控制。

3.1 新型能源子网的控制目标

新型能源子网的控制目标为维持系统的稳定运行,然而能源子网中光伏发电的不稳定性与随机性^[13]、储能充放电都会影响系统的功率平衡,进而影响系统电压的稳定。能源子网中的直流母线的简化等效电路如图3所示,其中, C_{dc} 为直流母线等效电容; P_G , P_{PV} 和 P_S 分别为电网、光伏发电及储能向直流母线注入的功率; P_{load} 为负荷消耗的功率。

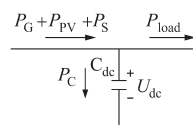


图3 直流母线等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of DC bus

直流母线功率 P_C 的表达式如下式所示:

$$P_C = P_G + P_{PV} + P_S - P_{load} \quad (1)$$

直流母线电压与功率的关系为

$$C_{dc} U_{dc} \cdot dU_{dc} / dt = P_G + P_{PV} + P_S - P_{load} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,通过保持直流母线电压稳定,可以保持能源子网系统功率平衡,从而达到系统稳定运行的控制目标。

3.2 光伏发电端口的控制

为实现能源利用最大化,将对光伏发电单元采用MPPT控制,使其始终工作在最大功率点。本文将选用Boost电路结构,并采用扰动观测法^[14]实现对光伏系统的最大功率点跟踪。扰动

观测法算法简单、系统响应快、精确度高;光伏发电单元直接连接到直流母线上,与传统的并网相比,省去了逆变环节,减少了电网损耗,降低了成本。

3.3 储能端口的控制

新型能源子网的储能端口采用全桥隔离型双向DC-DC拓扑结构。储能端口有充电和放电2种工作状态,本文选用单移相控制,以满足保持直流母线电压稳定的要求,控制框图如图4所示。

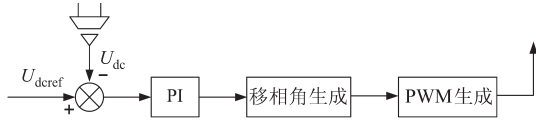


图4 储能端口控制框图

Fig.4 Control strategy of the energy storage port

储能端口的控制包括PI控制和单移相控制2部分。直流母线电压 U_{dc} 与参考电压 U_{dcref} ,经PI控制器、单移相控制模块产生PWM调制波,控制储能端口变流器。单移相控制算法较为简单,并且能通过调节移相角,实现能量双向流动。

3.4 交流主网1、主网2端口的控制

交流主网1、主网2端口DC/AC变流器采用三相全桥型拓扑结构,即电压型换流器(VSC)。基于新型能源子网的多运行物理场景的分析,交流主网1、主网2端口有3个工作状态,即并网、离网和电网供电。针对这3个工作状态,设计不同的控制,以满足新型能源子网的多运行物理场景的要求。

VSC的控制策略有很多种,包括恒电压控制、恒压恒频控制、下垂控制以及虚拟同步发电机控制(VSG)等。其中,恒电压控制适用于并网运行场景,恒压恒频控制适用于孤岛运行场景下,给系统提供稳定的电压和频率。下垂控制和VSG控制相比于其他2种控制,其优势在于可应用在并、离网等多种不同的运行场景;而VSG控制相比于下垂控制又增加了惯性环节,提高系统稳定性。因此,本文选择VSG控制进行交流口1、交流口2的多种工作状态的控制。

VSG控制框如图5所示,包括有功功率和无功功率2部分,有功功率通过VSG惯量方程和有功功率—频率下垂控制得到相位 θ ;无功功率通过无功功率—电压下垂控制得到电压给定,其中VSG惯量方程^[15]如下式所示:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

式中: J 为同步发电机的转动惯量; ω 为同步发电机的机械角速度; ω_0 为电网同步角速度; T_m, T_e, T_d 分别为同步发电机的机械转矩、电磁转矩、阻尼转矩; D 为阻尼系数。

发电机的输出电磁转矩 T_e 可以由其电动势 $e_{a,b,c}$ 和其输出电流 $i_{a,b,c}$ 计算得到,即

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (4)$$

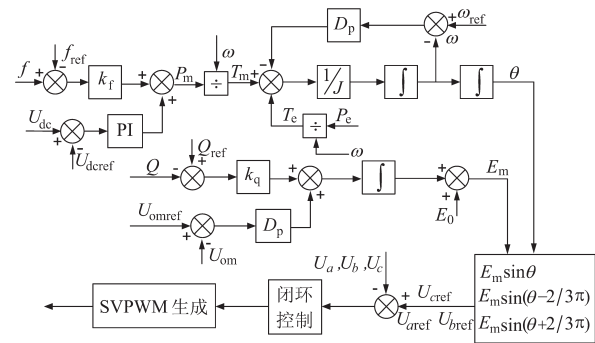


图5 虚拟同步发电机控制框图

Fig.5 Control strategy of the VSG

当太阳能发电量过剩时,电能通过交流主网1(2)端口并入电网,即阶段state1~state9。此时,交流主网端口1(2)的控制目标为保持系统稳定运行并且保证并入电网的电能不污染电网。因此,当交流主网1(2)端口并网运行时,VSG控制的控制量为交流电压 U_o 和频率 f 。

当电网出现故障或者并网与供电运行模式相互切换时,新型能源子网的交流主网端口将离网运行,即阶段state4~state17和state30~state32。此时,交流主网端口1(2)的控制目标为保证系统稳定运行,为系统提供稳定的电压和频率。因此,当交流主网1(2)端口离网运行时,VSG控制的控制量为交流电压 U_o 和频率 f 。

当太阳能发电量与储能单元释放的能量不足以支撑整个能源子网的负载需求时,交流主网1、主网2端口将从电网吸收能量,即阶段state10~state29。此时,系统由大电网提供稳定的电压和频率,以保证系统稳定运行。因此,当交流主网1(2)端口吸收电网能量运行时,VSG控制的控制量为直流电压 U_{dc} 和无功功率 Q 。

4 新型能源子网稳定控制

通过对各单元的控制情况分析,得知光伏发电端口和储能端口只有一种控制方式,交流主网1、主网2端口的VSG控制根据运行场景不同,控制量不同。本文将基于新型能源子网的多物理运行场景切换原则,结合各单元的控制情况分析,研究每种运行场景下新型能源子网的总体控制情况。

1) 双端并网运行场景。当能源子网运行在双端并网场景下,即运行场景 state1~state3。此时交流主网1、主网2端口均采用VSG控制(控制交流电压 U 和频率 f),储能端口采用单移相控制,光伏发电端口采用MPPT控制保证系统稳定运行。

2) 一端并网一端离网运行场景。当能源子网运行在一端并网一端离网场景下,即运行场景 state4~state9。此时交流主网1、主网2端口均采用VSG控制(控制交流电压 U 和频率 f),储能端口采用单移相控制,光伏发电端口采用MPPT控制保证系统稳定运行。

3) 一端离网一端供电、一端并网一端供电运行场景。当能源子网运行在一端离网一端供电场景和一端并网一端供电运行场景下,即运行场景 state10~state25。此时交流主网1、主网2端口采用VSG控制(离网/并网端口控制交流电压 U 和频率 f ,供电端口控制直流母线电压 U_{dc} 和无功功率 Q),储能端口采用移相控制,光伏发电端口采用MPPT控制保证系统稳定运行。

4) 双端供电运行场景。当能源子网运行在双端供电场景下,即运行场景 state26~state29。此时交流主网1、主网2端口均采用VSG控制(控制直流母线电压 U_{dc} 和无功功率 Q),储能端口采用单移相控制,光伏发电端口采用MPPT控制保证系统稳定运行。

5) 系统孤岛运行场景。当能源子网运行在系统孤岛场景下,即运行场景 state30~state32。此时交流主网1、主网2端口均采用VSG控制(控制交流电压 U 和频率 f),储能端口采用单移相控制,光伏发电端口采用MPPT控制保证系统稳定运行。

图6所示为新型能源子网运行模式切换时,系统整体控制模式的切换。(注:由于光伏发电端口和储能端口控制策略始终不变,图中只给出了

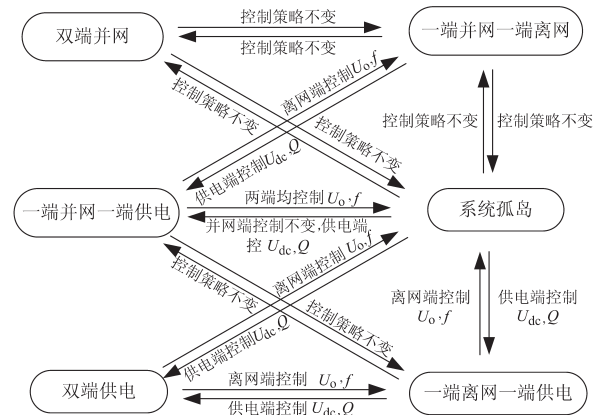


图6 控制策略切换原则

Fig. 6 Switching principle of control strategy

交流主网1、主网2端口的控制模式的切换。)

5 仿真验证

为验证本文所提出的基于新型能源子网各运行场景下控制策略的准确性,以图1中的新型能源子网拓扑结构为基础,在Matlab/Simulink环境下搭建仿真模型,该新型能源子网仿真模型部分参数为:储能容量20 kW·h,光伏功率65 kW,直流负载20 kW,交流负载30 kW,主网1、主网2电压380 V。

仿真将分别分析新型能源子网在并、离网运行下,分布式电源出力变化、交直流负载投切、交流主网故障等情况,展示了新型能源子网在不同运行场景及工况下各端口的稳态波形。

5.1 孤岛时交流负载变化的仿真分析

图7为新型能源子网在系统孤岛运行模式下的稳态仿真波形。0~0.5 s交流负载为20 kW,0.5 s时增加负荷至30 kW,1.0 s时减小负荷至20 kW。图7a为直流母线电压波形,可以看出,当交流负载的投切时,直流母线电压均可以在0.15 s内快速恢复,使直流母线电压始终保持在750 V左右稳定运行。图7b为储能端口功率波形,可以看出,

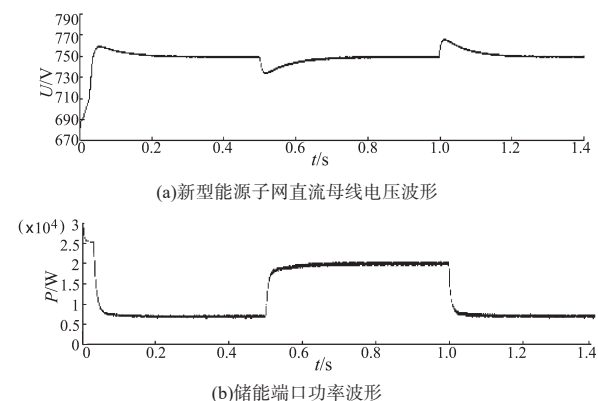


图7 柔性负载变化时的波形

Fig. 7 Energy sub grid waveforms of the flexible load change

当负载增加时,储能单元放电以保持系统稳定运行。

5.2 光伏发电单元变化的仿真分析

图8为新型能源子网在一端离网一端供电运行模式下的稳态仿真波形。0.2 s时,光照从 600 W/m^2 变化到 1000 W/m^2 ,此时发电功率从 37.5 kW 增加到 65 kW 。其中,图8a为光伏发电单元功率波形,0.2 s时光伏发电单元在 0.03 s 内完成最大功率跟踪;图8b为直流母线电压波形,可以看出直流母线在指令值 750 V 稳定运行,0.2 s时直流母线电压波动 3 V 左右,且在 0.05 s 内快速恢复;图8c为供电侧三相电压与电流波形,0.2 s时三相电流减小,电网供电功率减小,维持了系统的稳定运行;图8d为供电侧三相电压与电流波形,可以看出当光伏发电单元变化时,离网侧交流负载电压电流保持稳定。

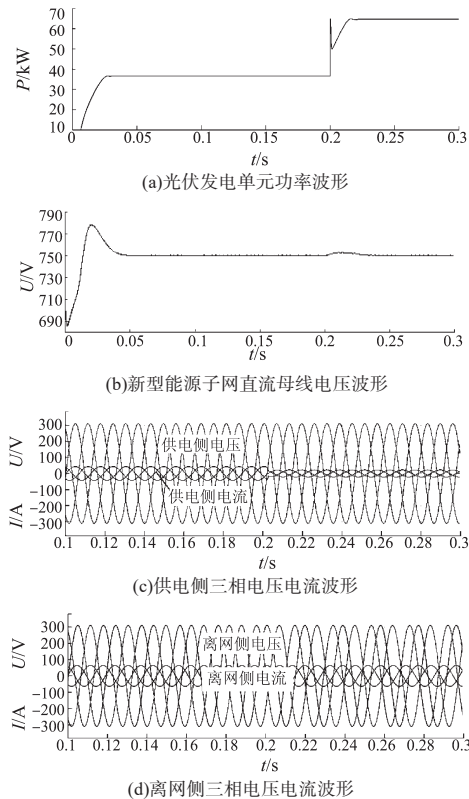


图8 Energy sub grid waveforms of the light intensity change

5.3 并网、离网及供电相切换的仿真分析

在 0.5 s 之前,系统交流主网1并网运行,交流主网2离网运行; 0.5 s 时,系统孤岛运行; 1.0 s 时,系统交流主网1处于供电状态,交流主网2离网运行。在此过程中,光伏单元发电量充足且恒定,交直流负荷保持不变。

如图9所示, 0.5 s 时交流主网1从并网状态

切入到离网状态,直流母线电压波动 5 V 左右并在 0.1 s 内快速恢复稳定,储能单元充电功率为 5 kW ; 1.0 s 时交流主网1从离网状态切入到供电状态,直流母线电压波动 10 V 左右并在 0.15 s 内快速恢复稳定,储能单元充电功率为 18 kW ,交流主网1侧电流在 0.1 s 内快速稳定且功率因数几乎为1。整个过程中,系统运行平稳,验证了该系统在并网、离网以及供电3种状态切换时的稳定性。

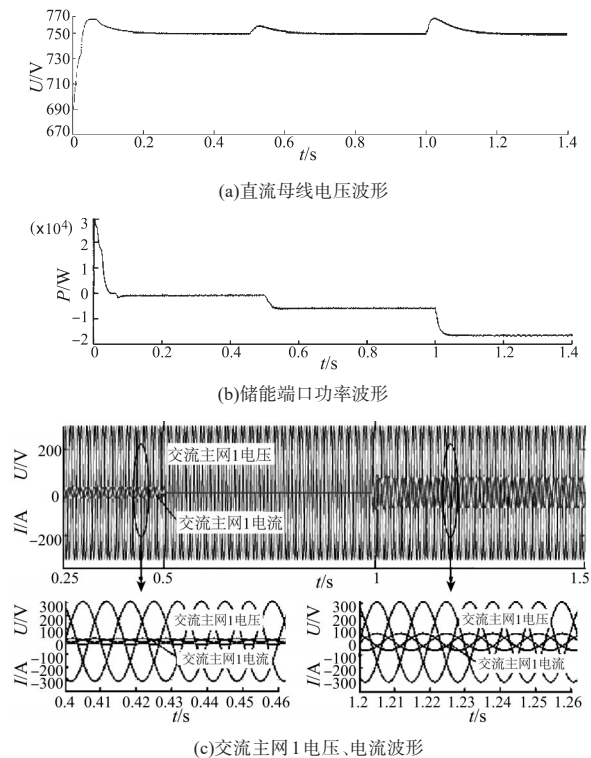


图9 供电、离网切换时的仿真波形

Fig.9 Waveforms during operation mode alteration

从图7~图9可以看出,在所提出的控制方法下,新型能源子网具有很好的稳定性,系统可靠性较高。

6 结论

本文基于一种新型能源子网结构,详细分析了其多运行物理场景;根据新型能源子网的多运行物理场景,设计了系统自稳定控制策略,有效地保证了直流母线电压的稳定;其次,设计了新型能源子网的运行场景切换原则,实现了多运行物理场景的平滑切换,避免了各变流器控制模式的频繁切换,实现了系统稳定运行。最后,基于新型能源子网的结构,在 Matlab/Simulink 环境下搭建了仿真模型,验证了新型能源子网控制策略的准确性。在后续的研究中,一方

面完善能源子网的协调控制,另一方面将研究能源子网的优化配置,从而实现新型能源子网系统的优化设计。

参考文献

- [1] 盛万兴,段青,孟晓丽,等. 电力电子化进程下的交直流无缝混合灵活配电系统研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1877-1889.
- [2] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, *et al.* The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: the Energy Internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1):138-144.
- [3] Ortiz G, Leibl M, Kolar J W, *et al.* Medium Frequency Transformers for Solid-state-transformer Applications-design and Experimental Verification[C]//IEEE Proceedings of the 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2013.
- [4] 王成山,王丹,周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):2-9.
- [5] 中国电力科学研究院. 第三代配电系统形态研究报告[R]. 北京:中国电力科学研究院配电所,2011.
- [6] 盛万兴,段青,梁英,等. 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3760-3769.
- [7] Xu Y, Zhang J H, Wang W Y, *et al.* Energy Router: Architectures and Functionalities Toward Energy Internet[C]// IEEE Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2011:31-36.
- [8] 马骏超,江全元,余鹏,等. 直流配电网能量优化控制技术综述[J]. 电力系统自动化,2013,37(24):89-96.
- [9] 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.
- [10] 王毅,张丽荣,李和明,等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24,4.
- [11] 王盼宝,王卫,孟尼娜,等. 基于运行模式与运行指标综合评价的直流微电网优化配置[J]. 电网技术,2016,40(3):741-748.
- [12] 唐西胜,张莘,孔力,等. GB/T 35727—2017. 中低压直流配电电压导则[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2018.
- [13] 刘家赢,韩肖清,王磊,等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术,2014,38(9):2356-2362.
- [14] 宋亮,王晓东,刘雯,等. 光伏电池 MPPT 扰动观察法的研究现状[J]. 半导体光电,2012,33(4):455-462.
- [15] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.

收稿日期:2018-07-16

修改稿日期:2018-11-15