

编者按语:

微电网能灵活控制分布式电源的特性,为开发利用我国种类丰富、储量可观的可再生能源资源提供了一种有效途径,有利于推动节能减排进程、提高电源结构低碳化程度、促进智能化绿色电力的发展。电力工作者为加快微电网的工程实践,在其分析建模、运行优化、控制策略、储能技术及装置、保护技术等方面做了较广泛的研究。本次微电网专题栏目即结合上述方面进行了深入研究和探讨。微电网中元件、设备类型复杂,运行特性不同,给系统建模、协调控制、综合保护等带来困难。为实现微电网稳定可靠、经济高效运行,需要在优化规划可再生能源组合,快速发展电力技术,合理建立系统分析模型,确定适宜的运行模式及切换方式,合理制定运行调度策略,研究新型设备及多种设备的综合控制方法,发展与微电网特征相适应的保护技术等方面进一步深入研究。欢迎就微电网理论、技术的研究及应用成果投稿本刊,参加讨论。

光储微电网孤岛系统的储能控制策略

李 斌,宝海龙,郭 力

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:分析了微电网孤岛系统稳定运行、能量供求平衡的机理和常规的微电网孤岛能量管理控制策略,提出一种新型超级电容与蓄电池混合储能系统的功率自适应控制策略,通过对混合储能系统进行上层的能量管理控制,使超级电容和蓄电池输出功率得到合理分配,以满足微电网孤岛运行时的电能质量要求和负荷的功率需求,并且能够提高系统全寿命周期经济性。最后建立了微电网孤岛系统的仿真模型,利用 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提策略的有效性,该控制策略优化了蓄电池的工作过程,延长了蓄电池使用寿命,并且不需要数据采集和通信环节,提高了微电网孤岛系统运行的可靠性和稳定性。

关键词:微电网; 储能; 蓄电池; 光伏发电系统; 孤岛运行; 自适应控制

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.002

0 引言

微电网可以与常规电网并网运行,也可以独立运行^[1-2]。近年来由于可再生能源发电装机容量不断增加,微电网孤岛运行时功率波动对电能质量与安全稳定的影响越来越受到重视。利用储能装置虽然可在一定程度上起到抑制功率波动的作用,但是单一的储能装置很难同时满足功率与能量两方面要求,而利用超级电容与蓄电池组成的混合储能系统对于微电网的稳定控制、电能质量的改善和不间断供电具有非常重要的作用^[3-6]。

文献[7]介绍了储能技术在分布式发电中的应用,以及各种储能方式的原理及其优缺点;文献[8]详细介绍了超级电容器作为储能方式在微电网中的应用;文献[9]针对超级电容与电池混合储能系统,在平滑控制与传统限值管理的基础上,提出了一种新的能量管理方法;文献[10]从理论上证明了混合储能可以充分利用蓄电池和超级电容器的互补特性,

提高储能的功率输出能力;文献[11]利用超级电容器功率密度高和循环寿命长的优点,通过双向 DC/DC 变换器的多滞环控制,优化了蓄电池的充放电过程,延长了其使用寿命;文献[12]提出了利用超级电容与蓄电池组成的混合储能系统来实现微电网孤岛运行时的功率平衡;文献[13]针对包含海水淡化负荷的风光柴储孤立微电网,设计了协调运行控制策略,该策略可以保证孤立系统的长期稳定运行,并且能够提高系统全寿命周期经济性。基于以上研究,可以发现,国内外关于混合储能的研究多是考虑储能设备在并网运行情况下,如何利用混合储能的互补特性而得到较为平滑和稳定的功率输出,避免由于分布式电源和储能设备的接入造成系统的功率波动。但在微电网孤岛运行的动态过程中,如何尽可能满足负荷的功率需求和可再生能源的最大功率输出,同时优化混合储能单元的工作特性以达到良好的技术经济性仍然是值得深入研究的重要课题之一。

但在以往的研究成果中,对于微电网孤岛运行情况下混合储能的控制策略一般需要实时采集微电网系统内的分布式电源出力及负荷需求,再由能量管理系统对储能设备进行功率分配,这种传统方式对于微电网覆盖面小、分布式电源种类少以及负荷分布集中的场合具有更好的可行性,但仍依赖于通信系统。

本文针对光伏发电单元与混合储能所构成的微电网孤岛系统,分析研究了微电网孤岛稳定运行对储

收稿日期:2013-05-08;修回日期:2014-01-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA-05A106);国家自然科学基金资助项目(50977061);天津市自然科学基金资助项目(11JCYBJC07600);国家电网公司科技项目

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A106),the National Natural Science Foundation of China(50977061),the Natural Science Foundation of Tianjin City(11JCYBJC07600) and the Technology Project of State Grid Corporation of China

能系统的要求,提出了由超级电容与蓄电池组成的混合储能系统的自适应能量管理控制策略,以达到在微电网孤岛运行模式下,功率波动时混合储能系统具有快速的响应能力,不仅满足微电网运行的电能质量要求,也最大限度地满足负荷的功率需求。该控制策略对于微电网中功率和能量的频繁快速变化,造成微电网孤岛系统内功率缺额不停地正负变化时,不需通过数据采集系统实时采集各种分布式电源的出力及负荷的需求来计算功率缺额,而是由超级电容直接实时补偿功率缺额,再由混合系统自主地合理分配功率缺额给蓄电池和超级电容。本方法适用于微电网内分布式电源多样以及负荷分布分散的情况,且有效地减少了蓄电池充放电次数,延长了其使用寿命,同时不需要额外的通信系统,提高了系统全寿命周期经济性。

1 光伏与混合储能所构成的微电网系统

1.1 微电网拓扑结构

本文研究的微电网系统采用建筑并网光伏电源。由于光伏电源出力具有间歇性和随机性,输出功率容易受到天气影响,尤其在多云天气,发电功率会出现快速剧烈变化,同时考虑到负荷的波动性,因此必须配备相应的储能单元^[14-15]。

蓄电池是当前最常用的储能单元,但由于其单体造价高,使用次数有限制,且单一的储能单元无法同时满足微电网系统对功率与能量的要求,所以本文采用超级电容与蓄电池组成的混合储能系统,以满足微电网运行的电能质量要求和负荷的功率需求。

双方共同构成的微电网孤岛系统如图 1 所示。

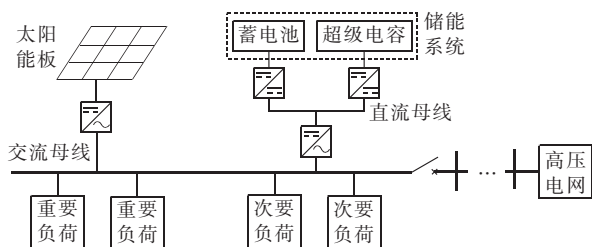


图 1 微电网孤岛系统结构图

Fig.1 Structure of islanded microgrid

蓄电池与超级电容通过各自的 DC/DC 变换器连接到直流母线上,再通过统一的 DC/AC 变换器连接到交流母线上,光伏发电系统通过 DC/AC 变换器直接与交流母线相连,再与负荷相连组成整个微电网系统。当微电网孤岛运行时,缺乏大电网供电,可能有负荷无法满足,则需要切除负荷。为使微电网保持足够的灵活性和可靠性,将微电网中的负荷分为重要负荷和次要负荷(可中断负荷)。

忽略系统各部分的能量损耗,由能量守恒可得上述系统各进线功率之间的关系式如下:

$$P_{\text{net-load}} = P_{\text{load}} - P_{\text{pv}} = P_{\text{bat}} + P_{\text{sc}} \quad (1)$$

其中, P_{bat} 为蓄电池功率; P_{sc} 为超级电容功率; P_{pv} 为光伏系统功率; P_{load} 为负荷功率; $P_{\text{net-load}}$ 为微电网孤岛净负荷功率(微电网孤岛运行时,净负荷功率等于微电网内负荷需求功率减去可再生能源的输出功率)。

1.2 混合储能系统

蓄电池属于能量型储能装置,输出功率变化范围小、变化速率慢,且充放电循环次数少(如铅酸蓄电池的满充放电循环次数仅为 600~1000 次^[16]);超级电容属于功率型储能装置,输出功率变化范围大、变化速率快,且充放电循环次数多^[17-18]。

本文采用的蓄电池模型由一个受控电压源和常值内阻串联组成^[19-21],在此模型中将蓄电池的充放电状态作为状态变量,蓄电池的参数均是根据放电特性曲线得到,并且也完全适用于充电特性。

受控源端电压的表达式为:

$$U_{\text{bat}} = U_{\text{bat0}} - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_{\text{bat}} dt} + A \exp\left(-B \int_0^t I_{\text{bat}} dt\right) \quad (2)$$

其中, U_{bat} 为蓄电池的空载电压(V); U_{bat0} 为蓄电池的恒定电压(V); I_{bat} 为蓄电池的出口电流(A); K 为极化电压(V); Q 为蓄电池的容量(A·h); A 为指数区域幅值(V); B 为指数区域时间常数的倒数(A/h)。

超级电容模型由一个受控电压源和常值电容并联组成。受控源端电压的表达式为:

$$U_{\text{sc}} = U_{\text{sc0}} - \int_0^t \frac{I_{\text{sc}}}{C} dt - RI_{\text{sc}} \quad (3)$$

其中, U_{sc} 为超级电容的端电压(V); U_{sc0} 为超级电容的初始电压(V); I_{sc} 为超级电容的出口电流(A); C 为超级电容的电容值(F); R 为超级电容的内阻(Ω)。

2 光储微电网系统孤岛运行的自适应控制

2.1 微电网系统内储能单元的功率变换器控制方式

光伏发电单元并网逆变器有单级式和双级式 2 种模型,均通过逆变控制实现光伏阵列的功率控制及输出。混合储能系统的双级式变流器主电路结构如图 2 所示。前级 DC/DC 模块允许能量的双向流动,为减小开关损耗,这里采用独立 PWM 控制方式,即当下桥臂进行 PWM、上桥臂关断时,电路处于 Boost 放电状态;当上桥臂进行 PWM、下桥臂关断时,电路处于 Buck 充电状态。后级 DC/AC 为三相电压源型双向变流器,最后经 LCL 滤波器与负荷相连。

DC/DC 模块和 DC/AC 模块通过直流母线电容解耦,2 级模块之间的功率变化将直接导致直流母线电容电压出现波动,其电容电压动态方程为:

$$C \frac{du_{\text{dc}}}{dt} = i_o - i_{\text{dc}} \quad (4)$$

其中, u_{dc} 、 i_o 和 i_{dc} 分别为直流母线电压、直流侧输出电流及 DC/AC 侧输入电流,如图 2 所示。

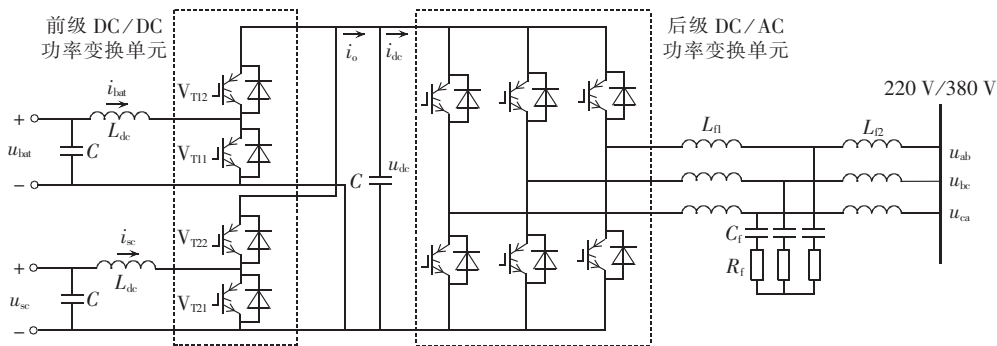


图 2 双级变流器主电路结构图
Fig.2 Main circuit of two-stage converter

忽略变流器损耗,直流侧输出功率为:

$$p_{dc} = u_{bat} i_{bat} + u_{sc} i_{sc} = u_{dc} i_o \quad (5)$$

其中, p_{dc} 、 u_{bat} 、 i_{bat} 、 u_{sc} 和 i_{sc} 分别为直流侧功率、蓄电池端电压、蓄电池输出电流、超级电容端电压及超级电容输出电流。

微电网孤岛运行时要保证微电网系统的功率动态平衡和系统电压质量满足负荷要求。各分布式电源的控制及配合应实现 2 个主要控制目标:

- 分布式电源和储能系统的输出功率控制;
- 微电网系统的电压控制。

鉴于超级电容的快速响应能力和蓄电池的能量储备容量,微电网在孤岛运行时不同储能设备应具有不同的控制策略并补偿相应的系统净负荷功率缺额。基于双级式变流器蓄电池和超级电容等储能装置孤岛运行时,蓄电池 DC/DC 变换器采用功率控制,对系统功率输出进行控制,超级电容 DC/DC 变换器控制直流母线电压。蓄电池和超级电容通过各自的 DC/DC 功率变换单元并联到直流母线上,再通过 DC/AC 功率变换单元连接到交流母线上。

蓄电池的电流参考值 i_{bat_ref} 可根据功率参考指令直接得到,其变流器功率控制框图如图 3 所示。蓄电池 DC/DC 模块在 i_{bat_ref} 为正时工作于 Boost 放电状态,在 i_{bat_ref} 为负时运行在 Buck 充电模式。

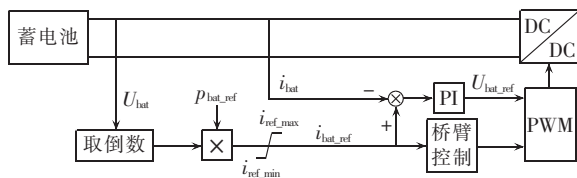


图 3 蓄电池 DC/DC 模块控制框图
Fig.3 Block diagram of DC/DC module control for battery

超级电容的电流参考值 i_{sc_ref} 可根据直流侧母线电压指令直接得到,其 DC/DC 电压控制框图见图 4。超级电容 DC/DC 支路的第一个 PI 控制环为无差调节,理想情况 i_{sc_ref} 等于 0,即在直流侧母线电压稳定后,超级电容器既不输出功率也不吸收功率。

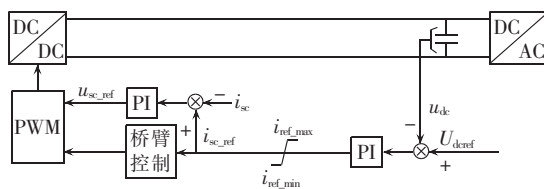


图 4 超级电容 DC/DC 模块控制框图
Fig.4 Block diagram of DC/DC module control for supercapacitor

2.2 微电网孤岛运行时混合储能的自适应控制策略

当微电网孤岛运行时,由于缺少外部大电网的电压和频率支撑,就需要微电网自身保持其内部电能的供求平衡,还需要保证电压和频率的质量。常规的微电网控制方式分为主从控制和对等控制。以主从控制为例,其意味着微电网中多个分布式电源只有 1 个或者多个分布式电源作为主控单元,采用 U/f 控制方式,其余的分布式电源均为从控单元,从控的分布式电源的并网控制都采用 PQ 控制。例如图 2 所示的混合储能系统主电路中超级电容采用 U/f 控制策略,蓄电池采用 PQ 控制策略。这种控制方式需要采集负荷的实时状态,计算出微电网孤岛系统的净负荷,进而决定采用 PQ 控制的储能系统的功率输出。在微电网孤岛系统中,数据的采集、计算和传输过程会造成一定的延时,影响系统的稳定性,同时这种控制方式也十分依赖通信设备,一旦发生通信异常情况,微电网的控制可能会失灵,甚至会导致系统的崩溃。

为避免这种情况的发生,本文提出了一种新型超级电容与蓄电池混合储能系统的功率自适应控制策略。这种自适应控制策略是在由图 3 和图 4 蓄电池和超级电容器组成的混合储能系统的基础上进行上层的功率控制。控制框图如图 5 所示。

当微电网系统孤岛运行时,如果功率需求发生变化,超级电容器优先动作补偿功率缺额,则此时系统的功率缺额为 P_{sc} ,如此便不需计算系统内的功率缺额,而是实时保持系统能量供求平衡。但由于超级电容本身能量密度较小,其输出功率越大或输出时间越长时,超级电容的能量越容易达到最大/最小限

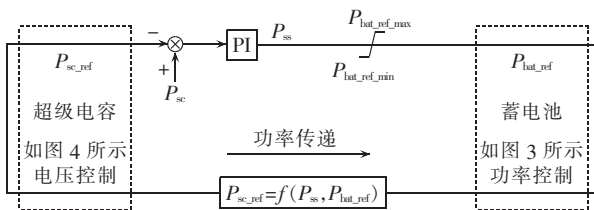


图 5 超级电容与蓄电池功率控制框图
Fig.5 Block diagram of power control for supercapacitor and battery

值,所以超级电容不能长时间对储能系统输出功率进行控制,本文通过自适应控制策略将暂时由超级电容承担的负荷缺额逐步转移给蓄电池,由蓄电池来承担功率缺额的补偿,即图 5 中所示 P_{ss} 。在这种控制策略下,蓄电池的功率变化更为平滑,不会像常规控制那样造成蓄电池功率变化过快,并减少了蓄电池充放电次数。当直流侧母线电压稳定时,超级电容器不再输出功率,此时微电网孤岛系统净负荷的功率缺额由蓄电池全部补偿,则微电网孤岛净负荷功率为:

$$P_{net-load} = P_{load} - P_{pv} = P_{bat} \quad (6)$$

如果蓄电池无法全部补偿微电网孤岛系统的功率缺额,超级电容就需要承担剩余的功率缺额,以保证系统的电能质量要求和负荷的功率需求。如果功率缺额超出混合储能系统所能承受的范围,为保证主要负荷的正常工作,就需要切除部分或全部切除次要负荷以保证系统稳定运行。

图 5 中超级电容功率 P_{sc} (系统功率缺额)与参考值 P_{sc_ref} (初始为 0)做差即为微电网孤岛系统的瞬时功率缺额,再通过 PI 控制环节调节得到系统稳定时的功率缺额 P_{ss} ,如果 P_{ss} 未超出蓄电池的功率限值,此时蓄电池输出功率的参考值与 P_{ss} 相等,如果 P_{ss} 超出了蓄电池的功率限值,蓄电池输出功率为上/下限值。 P_{bat_ref} 为负表示充电,为正则表示放电。

微电网孤岛系统中超级电容输出功率的参考值 P_{sc_ref} 的大小取决于系统稳定时的功率缺额 P_{ss} 与蓄电池输出功率的参考值 P_{bat_ref} ,即:

$$P_{sc_ref} = f(P_{ss}, P_{bat_ref}) \quad (7)$$

当 $P_{bat_ref_min} \leq P_{ss} \leq P_{bat_ref_max}$ 时,系统稳定时的功率缺额 P_{ss} 未超出蓄电池输出功率的上下限值,即系统稳定时的功率缺额由蓄电池全部供给,不存在剩余功率,超级电容不需要参与功率调节,即:

$$P_{sc_ref} = 0 \quad (8)$$

当 $P_{ss} < P_{bat_ref_min} < 0$ 或者 $P_{ss} > P_{bat_ref_max} > 0$ 时,系统稳定时的功率缺额 P_{ss} 超出蓄电池输出功率的上下限值,蓄电池无法再进行充电或者放电,此时微电网孤岛系统存在剩余功率,需要超级电容参与功率调节,补偿剩余功率,即:

$$P_{sc_ref} = P_{ss} - P_{bat_ref} \quad (9)$$

P_{sc_ref} 为负表示充电,为正则表示放电。如果超

级电容由于其储能限制而不能满足对功率缺额的补偿,则必须采取相应的切负荷措施。

3 PSCAD 仿真验证

为验证本文所提出控制策略的正确性,根据图 1 的微电网孤岛系统结构图,在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建了一个含光伏发电系统和混合储能系统(蓄电池与超级电容并联)及不同负载的微电网孤岛仿真平台。其中光伏发电系统输出功率波动范围为 5~15 kW,假设实际微电网孤岛中光伏和负荷的功率采集、数据处理和数据通信时间为 0.1 s。

蓄电池储能系统额定功率为 20 kW,按照其满容量且以最大功率输出时持续时间不小于 10 h 的原则,确定其容量为 400 A·h,额定电压为 500 V;超级电容储能系统额定功率为 20 kW,按照其满容量且以最大功率输出时持续时间不小于 30 s 的原则,确定其电容值为 10 F,额定电压为 400 V。

下面通过不同算例对本文提出的微电网自适应控制策略和常规的微电网控制策略进行比较,以验证负荷需求功率和光伏发电系统输出功率在各种变化情况下本文提出的控制策略的有效性。

算例 1:保持光伏发电系统输出功率固定,在 0.2 s 时系统三相对称负荷需求功率骤降,净负荷由 12 kW 骤降为 4 kW,具体仿真结果如图 6 所示。

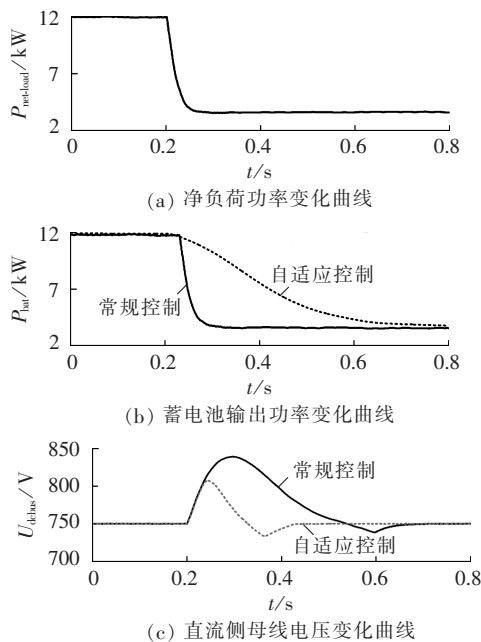


图 6 算例 1 的仿真验证波形图
Fig.6 Simulative waveforms of case 1

通过对图 6 中蓄电池输出功率的对比,发现在负荷需求功率骤降时,在常规控制策略中蓄电池输出功率变化剧烈,对蓄电池冲击大;在自适应控制策略下蓄电池输出功率变化较平滑,对蓄电池起到保护作用。通过对孤岛系统直流侧母线电压的对比,发现在负

荷需求功率骤降时,具有自适应控制策略的直流侧母线电压相对于常规控制策略的直流侧母线电压变化范围小,恢复时间短,这有利于保证微电网孤岛系统的稳定性和系统运行的电能质量。

算例 2:保持光伏发电系统输出功率固定,在 0.2 s 时系统三相对称负荷需求功率发生短时变化后又恢复到原值,即净负荷由 -4 kW 升高到 6 kW 又迅速降落到 -4 kW,具体仿真结果如图 7 所示。

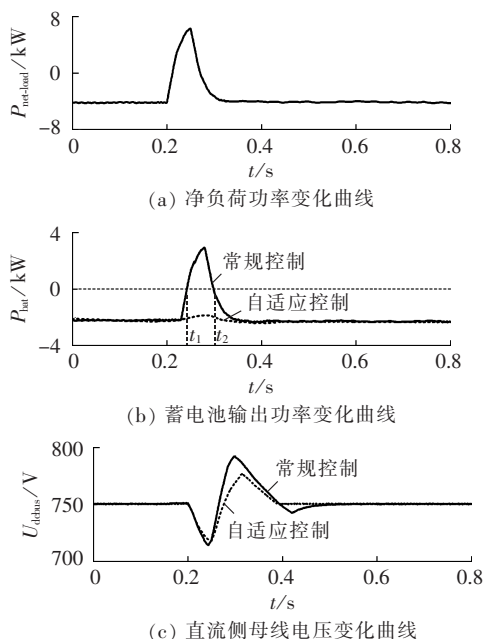


图 7 算例 2 的仿真实验验证波形图

Fig.7 Simulative waveforms of case 2

通过对图 7 中蓄电池输出功率变化的对比可以发现,在负荷需求功率短时升高并迅速恢复到原值时,具有自适应控制策略的混合储能系统中蓄电池输出功率基本不变,对蓄电池冲击小;而采用常规控制时蓄电池输出功率分别在 t_1 和 t_2 2 次穿越零点,意味着瞬时出现了 1 次放电和充电的过程,对蓄电池冲击大。通过对孤岛系统直流侧母线电压的对比,发现在负荷需求功率短时升高并迅速恢复到原值时,与负荷骤降时结果相同,具有自适应控制的直流侧母线电压变化范围小,恢复时间短,有利于保证微电网孤岛系统的稳定性和系统运行的电能质量。

算例 3:系统三相对称负荷需求功率恒定,光伏发电出力分别在 0.2 s 和 0.4 s 时因光照强度的变化而发生变化,净负荷在 0.2 s 时由 6 kW 降至 -3 kW,在 0.4 s 时升高到 2 kW,具体仿真结果如图 8 所示。

通过对图 8 中蓄电池输出功率变化的对比发现,在负荷需求功率由 6 kW 降至 -3 kW,运行一段时间又升至 2 kW 时,具有自适应控制策略的混合储能系统中由于超级电容对功率缺额的短时支撑作用,使蓄电池输出功率平滑地由 6 kW 过渡到 2 kW,并未对蓄电池进行充放电;而采用常规控制的蓄电池输

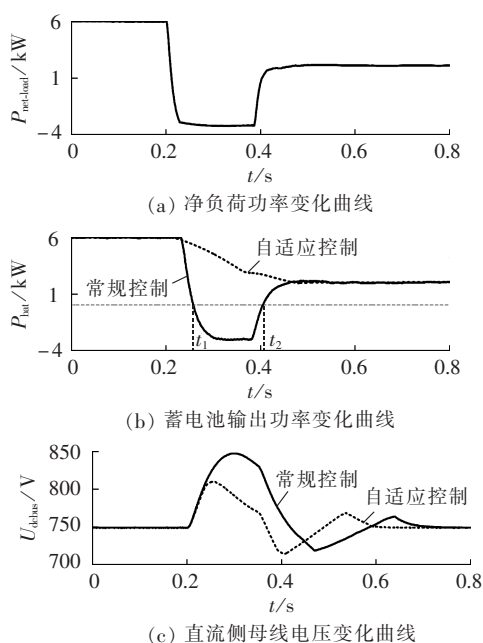


图 8 算例 3 的仿真实验验证波形图

Fig.8 Simulative waveforms of case 3

出功率在 t_1 和 t_2 分别穿越零点,进行了 1 次充放电,对蓄电池冲击大,在实际应用中,负荷需求功率的这种短时突变会造成蓄电池频繁充放电,影响蓄电池的使用寿命,破坏了系统全寿命周期经济性。通过对孤岛系统直流侧母线电压的对比,发现在负荷需求功率由 6 kW 降至 -3 kW,运行一段时间又升至 2 kW 时,与负荷骤降时结果相同,具有自适应控制的直流侧母线电压变化范围小,恢复时间短,有利于保证微电网孤岛系统的稳定性和系统运行的电能质量。

算例 4:保持光伏发电系统输出功率固定,在 0.2 s 时系统三相对称负荷需求功率随时间逐步增加,需求功率过零点之后发生一次跌落,净负荷在 -4 kW 到 12 kW 之间变化,具体仿真结果见图 9。

通过对图 9 中蓄电池输出功率变化的对比发现,在净负荷需求功率随时间逐步增加并在过零点后发生一次跌落,在 -4~12 kW 间变化时,常规控制策略下的蓄电池输出功率基本跟随净负荷需求功率的变化,会多次穿越零点进行充放电;而自适应功率控制是跟随净负荷需求功率的变化趋势,只穿越一次零点,很好地保护了蓄电池。通过对孤岛系统直流侧母线电压的对比发现,由于 PI 控制环的存在,这种功率缺额不断缓慢变化的情况,导致自适应控制下的直流侧母线电压恢复存在几十毫秒的延迟,这是在系统允许范围内的,但对微电网系统而言却避免了蓄电池的频繁充放电,优化了储能系统的工作过程,达到了更好的技术经济效果。

算例 5:保持光伏发电系统输出功率固定,蓄电池运行在满功率输出状态(20 kW),在 0.7 s 时系统三相对称负荷需求功率发生短时变化后又恢复到原

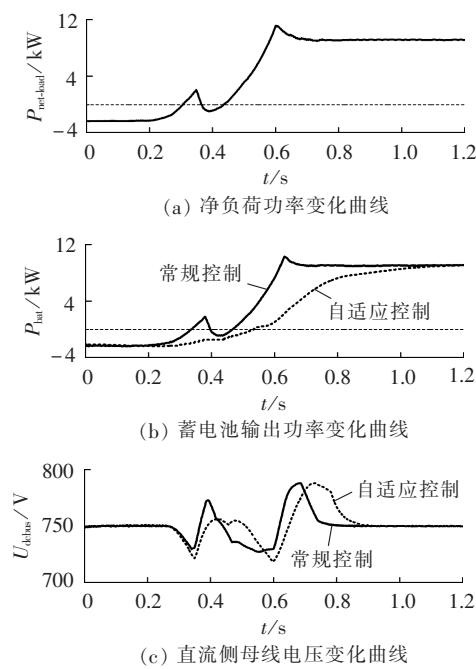


图 9 算例 4 的仿真验证波形图
Fig.9 Simulative waveforms of case 4

值,即净负荷由 20 kW 升高到 25 kW 又迅速降落到 20 kW,具体仿真结果如图 10 所示。

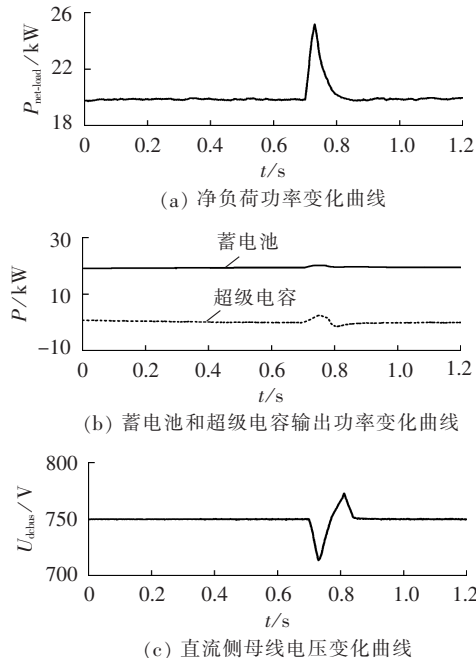


图 10 算例 5 的仿真验证波形图
Fig.10 Simulative waveforms of case 5

通过对图 10 中蓄电池和超级电容输出功率变化的对比发现,在 0.7 s 负荷需求功率短时升高并迅速恢复到原值,由于蓄电池运行在满功率状态下,蓄电池输出功率不变,由超级电容补偿瞬时功率缺额,直流侧母线电压波动在允许范围内,并在短时间内能够恢复到原值。可见,在蓄电池无法补偿微电网孤岛的瞬时功率缺额从而启动超级电容补偿的情

况时,具有自适应控制的混合储能系统能够稳定运行,当然,超级电容不能长时间输出功率,需要配置相应的保护措施以保证系统的稳定运行。

算例 6:保持光伏发电系统输出功率固定,蓄电池和超级电容均运行在满功率输出情况(20 kW),在 0.4 s 时系统三相对称负荷需求功率增加,此时已经超出了光伏发电系统和混合储能系统最大输出范围,必然导致系统的不稳定运行,需要切除次要负荷,具体仿真结果如图 11 所示。

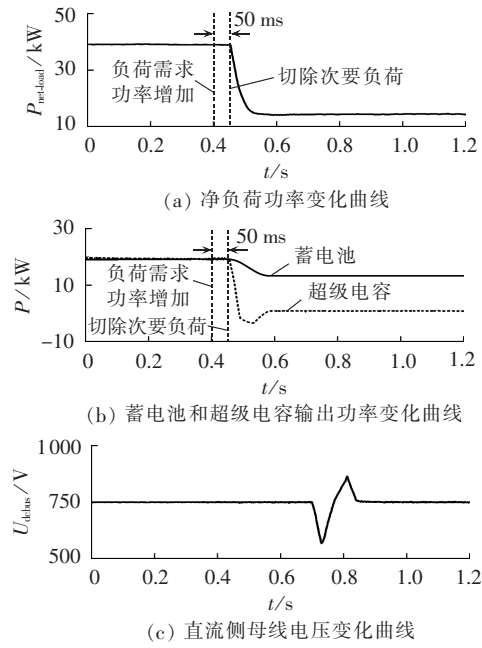


图 11 算例 6 的仿真验证波形图
Fig.11 Simulative waveforms of case 6

通过对图 11 中蓄电池和超级电容输出功率变化的对比发现,在 0.4 s 负荷需求功率升高时,由于蓄电池和超级电容均运行在满功率状态下,超出了混合储能系统的承受范围,功率缺额无法被补偿,根据孤岛检测原理,系统电压降低,微电网孤岛运行不稳定,需切除次要负荷。在 0.4 s 时直流侧母线电压骤降,超出系统允许运行范围,微电网孤岛保护装置启动,并在 50 ms 后切除次要负荷,蓄电池和超级电容输出功率降低,微电网孤岛系统内功率重新达到平衡状态,直流侧母线电压恢复到 750 V,系统进入稳定运行状态。

由上述仿真结果对比可知,本文提出的自适应能量管理控制策略改善了系统运行的电能质量要求,也最大限度地满足了负荷的功率需求,同时优化了蓄电池的工作过程,延长了蓄电池使用寿命。

4 结论

由于光伏、风电等可再生能源发电系统的输出功率具有间歇性和随机性等缺点,当其在微电网孤岛系统中渗透率较大时,必将影响微电网的安全稳定

运行,因此微电网孤岛系统需要配备输出功率更为稳定的储能系统,以维持微电网孤岛的稳定运行,并实现微电网孤岛系统内部能量的瞬时平衡。本文提出了一种新型超级电容与蓄电池混合储能系统的自适应功率控制策略,利用超级电容的高功率密度特性,大幅提高了混合储能系统对功率的实时响应能力,有效实现了微电网的瞬时功率平衡。PSCAD/EMTDC仿真结果表明,所提控制策略能够充分利用超级电容器功率密度高和循环寿命长的优点来补偿可再生能源输出功率和负荷功率的瞬时波动,再逐步由蓄电池补偿功率缺额,该控制策略优化了蓄电池的工作过程,延长了蓄电池使用寿命,并且不需要数据采集和通信环节,提高了微电网孤岛系统运行的可靠性和稳定性,为光伏发电系统与混合储能系统实现经济有效的微电网孤岛运行提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 王成山,杨占刚,王守相,等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):99-105.
WANG Chengshan,YANG Zhangang,WANG Shouxiang,et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):99-105.
- [2] 王成山,杨占刚,武震. 一个实际小型光伏微网系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):6-10.
WANG Chengshan,YANG Zhangang,WU Zhen. Design and realization of practical photovoltaic microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):6-10.
- [3] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG Chengshan,WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):1-4.
- [4] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
YU Shenhong,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.
- [5] 丁明,徐宁舟,毕锐. 负荷侧新型电池储能电站动态功能的研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):1-7.
DING Ming,XU Ningzhou,BI Rui. Dynamic model of new-type battery energy storage system at demand side[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):1-7.
- [6] 梁亮,李建林,惠东. 光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):20-23.
LIANG Liang,LI Jianlin,HUI Dong. Operating modes of photovoltaic-energy-storage hybrid system and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):20-23.
- [7] 程华,徐政. 分布式发电中的储能技术[J]. 高压电器,2003,39(3):53-56.
CHENG Hua,XU Zheng. Energy storage for use with distribution power generation[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(3):53-56.
- [8] 鲁鸿毅,何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):89-91.
- [9] LU Hongyi,HE Benteng. Application of the super-capacitor in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(22):89-91.
- [9] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):36-41.
ZHANG Ye,GUO Li,JIA Hongjie,et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(16):36-41.
- [10] DOUGAL R A,LIU S,WHITE R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies,2002,25(1):120-131.
- [11] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):85-89.
ZHANG Guojun,TANG Xisheng,QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(12):85-89.
- [12] ZHOU Haihua,BHATTACHARYA T,TRAN D,et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):923-930.
- [13] 刘梦璇,郭力,王成山,等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(15):19-24.
LIU Mengxuan,GUO Li,WANG Chengshan,et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power,photovoltaic system,diesel generator,and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(15):19-24.
- [14] 吴理博,赵争鸣,刘建政,等. 独立光伏照明系统中的能量管理控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(22):68-72.
WU Libo,ZHAO Zhengming,LIU Jianzheng,et al. A novel energy management and control for stand-alone photovoltaic lighting system[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(22):68-72.
- [15] 唐西胜,邓卫,李宇宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):34-38,62.
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):34-38,62.
- [16] RYDH C J,SANDEN B A. Energy analysis of batteries in photovoltaic system:part I performance and energy requirement[J]. Energy Conversion and Management,2005(46):1957-1979.
- [17] 郑文迪,蔡金锭. 燃料电池超级电容器混合发电系统能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):28-32,42.
ZHENG Wendi,CAI Jinding. Energy management strategy for hybrid generation system with fuel cell and super-capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):28-32,42.
- [18] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(6):34-38,62.
ZHANG Ye,GUO Li,JIA Hongjie,et al. An energy storage control method based on state of charge and variable filter time constant[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(6):34-38,62.
- [19] 杨勇. 太阳能系统用铅酸蓄电池综述[J]. 蓄电池,2009(2):51-57.
YANG Yong. Lead acid batteries for PV systems[J]. Chinese Labat Man,2009(2):51-57.
- [20] 颜志敏,王承民,郑健,等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估

模型[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):57-61.

YAN Zhimin,WANG Chengmin,ZHENG Jian,et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(2):57-61.

[21] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):85-89.

ZHANG Guojun,TANG Xisheng,QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitor and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34 (12):85-89.

作者简介:



李 斌(1976-),男,甘肃兰州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:binli@tju.edu.cn);

宝海龙(1988-),男,辽宁北票人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电、微电网的保护与控制(E-mail:bhl@tju.edu.cn);

郭 力(1981-),男,山东济宁人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电、微电网系统(E-mail:liguo@tju.edu.cn)。

Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems

LI Bin,BAO Hailong,GUO Li

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: The stable operation and energy balance of islanded microgrid and its traditional energy management strategy are analyzed and a strategy of adaptive power control is proposed for its hybrid battery-supercapacitor storage system. In order to meet the requirements of islanded microgrid for both power quality and load and enhance the system economics over lifetime,the output power of hybrid battery-supercapacitor storage system is reasonably allocated between supercapacitor and battery by its high-level energy management. A PSCAD/EMTDC model of islanded microgrid is built to verify the validity of the proposed strategy,which optimizes the working process of battery,prolongs its service life,cancels the data collection and communication and improves the operational reliability and stability of islanded microgrid.

Key words: microgrid; energy storage; electric batteries; photovoltaic generation system; islanded operation; adaptive control

(上接第 7 页 continued from page 7)

of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):94-99.

[16] CASTRO R,FERREIRA L A. Comparison between chronological and probabilistic methods to estimate wind power capacity credit[J]. IEEE Trans on Power Systems,2001,16(4):904-909.

[17] ALVARADO F L. Penalty factors form Newton's method[J]. IEEE Trans on PAS,1978,97(6):2030-2040.

[18] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.

ZHANG Liying,YE Tinglu,XIN Yaozhong,et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):1-9.

作者简介:



李国庆(1963-),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统的安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化(E-mail:lgq@mail.nedu.edu.cn);

孙银锋(1983-),男,吉林四平人,博士研究生,研究方向为电力系统安全性与稳定性分析(E-mail:syf5883@163.com);

王利猛(1971-),男,吉林吉林人,副教授,博士研究生,研究方向为电力系统安全性与稳定性分析。

Interregional available transfer capability research based on interior point method with consideration of wind power penetration level

LI Guoqing¹,SUN Yinfeng²,WANG Limeng²

(1. School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China;

2. School of Electrical and Electronics Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: According to the expression of reactive power by terminal voltage and active power for SCIM (Squirrel-Cage Induction Machine),the Jacobian and Hessian matrices of primal-dual interior point algorithm are modified to coordinate its calculation accuracy and iteration efficiency. The continuation power flow algorithm is adopted to calculate the penetration limit for different buses and the ATC(Available Transfer Capability) of SCIM and DFIG(Doubly Fed Induction Generator) controlled by constant power factor under different penetration levels are obtained. Simulative results show that,the wind farm connecting to the tie-area may significantly improve the ATC between sending and receiving areas while the wind farm connecting to the sending area may worsen the ATC;the power factor of DFIG has larger influence on ATC;and multiple bus-voltage limit-violation may induce the local optimum of algorithm under some grid-connection modes,against which reasonable compensation measures should be applied.

Key words: wind power; available transfer capability; iteration efficiency; local optimum; Jacobian matrices; Hessian matrices; penetration level; tie-area; models