



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107017617 A

(43)申请公布日 2017.08.04

(21)申请号 201710386077.0

(22)申请日 2017.05.26

(71)申请人 太原理工大学

地址 030024 山西省太原市万柏林区迎泽西大街79号

(72)发明人 秦文萍 张宋杰 韩肖清 王鹏 王英 贾燕冰 孟润泉 任春光 王磊

(74)专利代理机构 太原市科瑞达专利代理有限公司 14101

代理人 卢茂春

(51)Int. Cl.

H02J 1/10(2006.01)

H02J 7/34(2006.01)

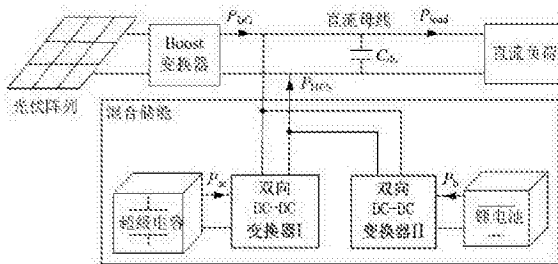
权利要求书2页 说明书4页 附图2页

(54)发明名称

改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法

(57)摘要

一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法,涉及直流微电网的稳定运行领域;其特征是所述改进的直流微电网中混合储能系统,是由锂电池通过DC/DC变换器I连接于直流母线上,超级电容通过DC/DC变换器II连接于直流母线上,形成并联结构的混合储能系统。本发明有效解决了混合储能系统在直流微电网中锂电池对超级电容有效补偿能量的问题,提供一种直流微电网中混合储能系统改进自适应下垂控制方法。



1. 一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法,其特征是所述改进的直流微电网中混合储能系统,是由锂电池通过DC/DC变换器I连接于直流母线上,超级电容通过DC/DC变换器II连接于直流母线上,形成并联结构的混合储能系统。

2. 根据权利要求1所述一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法,其特征是所述DC/DC变换器I、DC/DC变换器II均采用双向Boost-Buck电路结构。

3. 根据权利要求1所述一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法,其特征是包括下述内容:

(1) 双向DC/DC变换器I为前级控制,使超级电容优先动作;双向DC/DC变换器II后级控制,维持超级电容的容量在正常工作范围,稳定微电网的功率平衡;

(2) 双向DC/DC变换器I采用超级电容电流-直流母线电压下垂控制方式,控制超级电容向直流母线充放电;所述超级电容电流-直流母线电压下垂控制方式为:设定 $U_{dc}$ 为直流母线电压, $n_{sc}$ 为下垂系数(取2~5), $U_{dc-ref}$ 为双向DC/DC变换器I控制器的直流母线电压参考值;计算双向DC/DC变换器I控制的超级电容充放电电流 $I_{sc} = n_{sc} (U_{dc-ref} - U_{dc})$ ;

(3) 双向DC/DC变换器II采用锂电池电流-超级电容电压下垂控制方式,控制锂电池向直流母线充放电,锂电池的输出控制以超级电容电压作为反馈信息;所述锂电池电流-超级电容电压下垂控制方式为:

设定 $U_{sc1}$ 、 $U_{sc2}$ 、 $U_{sc3}$ 、 $U_{sc4}$ ,并使得 $U_{sc1} < U_{sc2} < U_{sc3} < U_{sc4}$ ,其中 $U_{sc2}$ 、 $U_{sc3}$ 为超级电容最佳工作电压区间阈值, $U_{sc1}$ 、 $U_{sc4}$ 为超级电容最大工作电压区间临界值;

分别为锂电池根据超级电容储能容量而设置的工作临界电压值; $I_{bm}$ 为锂电池充放电电流限值; $n_b$ 为下垂关系的下垂系数;

根据锂电池电流-超级电容电压下垂关系,双向DC/DC变换器II控制的锂电池输出电流计算表达式如下:

$$I_b = \begin{cases} -I_{bm} & U_{sc4} \leq U_{sc} \\ n_b(U_{sc} - U_{sc3}) & U_{sc3} \leq U_{sc} < U_{sc4} \\ 0 & U_{sc2} < U_{sc} < U_{sc3} \\ n_b(U_{sc} - U_{sc2}) & U_{sc1} < U_{sc} \leq U_{sc2} \\ I_{bm} & U_{sc} \leq U_{sc1} \end{cases}$$

当超级电容电压 $U_{sc}$ 介于 $U_{sc2}$ 和 $U_{sc3}$ 之间时,双向DC/DC变换器II不工作,减少锂电池的动作次数;

当 $U_{sc1} < U_{sc} \leq U_{sc2}$ 时,锂电池根据下垂关系开始放电;

当 $U_{sc3} \leq U_{sc} < U_{sc4}$ 时,锂电池进行充电;

(4) 直流母线电压允许偏差限值为额定电压 $U_{dcr}$ 的 $\pm 5\%$ ;

设定 $U_{dch}$ 为直流母线电压允许波动电压带的上临界值, $U_{dc1}$ 为直流母线电压允许波动电压带的下临界值;

$U_{dch} = (1+5\%) U_{dcr}$ , $U_{dc1} = (1-5\%) U_{dcr}$ ;双向DC/DC变换器I根据直流母线电压参考值整定流程来调节自适应下垂运行曲线;具体调节方法如下:

当超级电容保持在最佳运行区间 $U_{sc2} \leq U_{sc} \leq U_{sc3}$ ,且不需要能量补偿时,超级电容将直流母线电压维持在允许波动电压带;

$U_{dc} > U_{dch}$ , 则  $U_{dc-ref} = U_{dch}$ ;  $U_{dc} < U_{dc1}$ , 则  $U_{dc-ref} = U_{dc1}$ ; 直流母线电压参考值根据直流母线电压波动整定, 双向DC/DC变换器I控制超级电容以工作最优曲线运行; 所述最优曲线包括充电曲线:  $I_{sc} = n_{sc} (U_{dch} - U_{dc})$ ; 放电曲线:  $I_{sc} = n_{sc} (U_{dc1} - U_{dc})$ ;

当锂电池工作时, 超级电容作为信息反馈载体, 为了避免允许波动电压带使超级电容处于空闲或欠补偿状态, 采取如下方法:

$U_{sc} > U_{sc3}$  锂电池充电时, 直流母线电压参考值整定值为:  $U_{dc-ref} = U_{dch}$ , 双向DC/DC变换器I控制超级电容以放电恢复曲线  $I_{sc} = n_{sc} (U_{dch} - U_{dc})$  运行; 当  $U_{sc} < U_{sc2}$  锂电池放电时, 直流母线电压参考值整定值为:  $U_{dc-ref} = U_{dc1}$ , 双向DC/DC变换器I控制超级电容以充电恢复曲线  $I_{sc} = n_{sc} (U_{dc1} - U_{dc})$  运行。

## 改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及直流微电网的稳定运行,具体是一种改进的混合储能系统自适应下垂控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着新能源发展的不断升温,直流微电网已成为分布式微电源重要的结网方式之一。微电网在孤岛运行模式下,维持直流母线电压稳定是整个微电网系统稳定运行的前提。电力储能技术作为维持微电网系统稳定运行和提高电能质量的关键环节,伴随微电网的发展应运而生。而由于储能元件各自的输出缺陷,单一储能元件在微电网中的应用受到限制。近年来,多种储能元件复合使用引起了人们的广泛关注。

[0003] 锂电池具有较大的能量密度,但循环寿命短,且不适合大功率充放电,其一般应用于微电网中功率的削峰填谷。而近几年发展起来的超级电容器是一种新型功率型储能元件,其具有较高的介电常数和耐压能力。超级电容虽然能量密度比较低,但是有着普通电容器快速频繁充放电的优势,可以在短时间内吸收和释放大的功率电流。基于两者优势互补的运行特性,专家们将两者结合使用,并构成锂电池-超级电容混合储能系统。混合储能系统不仅能够优化锂电池充放电电流,延长储能系统寿命,而且可以提高混合储能系统动态响应。而如何控制锂电池和超级电容合理分配和承担调节直流微电网中电力波动的任务,同时提高混合储能系统自身使用寿命是目前混合储能技术的研究难点。为了平滑锂电池电流,有学者提出利用滤波器将直流母线上的功率波动分为低频分量和高频分量。高频分量与低频分量的波动分别由超级电容和锂电池进行补偿。也有学者提出一种锂电池依据超级电容荷电量来调整出力的策略,实现了锂电池电流的平滑控制。根据超级电容电压不可突变的特点,锂电池能够较好地控制输出。但是超级电容和锂电池的协调控制运行还需要进一步完善。

### 发明内容

[0004] 本发明解决混合储能系统在直流微电网中锂电池与超级电容级联控制方式下存在不匹配的问题,即由于直流母线电压处于允许波动范围的不动作电压带 ( $U_{dc1} \leq U_{dc} \leq U_{dch}$ ) 导致超级电容不能正确响应锂电池的能量补偿,提供一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法。该方法中,锂电池和超级电容构成混合储能系统,利用超级电容电压不可突变的特点控制锂电池电流平滑输出;并通过整定直流母线电压参考值,设计了以直流母线电压为反馈信息的超级电容自适应下垂控制方法,实现了混合储能系统运行能够有效越过直流母线允许波动电压带,提高锂电池和超级电容级联控制方式的可靠性。

[0005] 本发明的技术方案:一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法,所述改进的直流微电网中混合储能系统是由锂电池通过DC/DC变换器I连接于直流母线上,超级电容通过DC/DC变换器II连接于直流母线上,形成并联结构的混合储能系统。

[0006] 所述DC/DC变换器I、DC/DC变换器II均采用双向Boost-Buck电路结构。

[0007] 一种改进的直流微电网中混合储能系统自适应下垂控制方法,包括下述内容:

[0008] (1) 超级电容器的双向DC/DC变换器I的控制

[0009] 双向DC/DC变换器I作为前级控制,超级电容优先动作;超级电容的输出控制以直流母线电压作为反馈信息,双向DC/DC变换器I采用超级电容电流-直流母线电压( $I_{sc}-U_{dc}$ )下垂控制方式,控制超级电容向直流母线充放电;

[0010] 直流母线电压允许偏差限值为额定电压 $U_{dcr}$ 的 $\pm 5\%$ ;设定 $U_{dch}$ 为直流母线电压允许波动的上临界值, $U_{dch} = (1+5\%)U_{dcr}$ ;  $U_{dc1}$ 为直流母线电压允许波动的下临界值, $U_{dc1} = (1-5\%)U_{dcr}$ ;

[0011] 为了协调超级电容和锂电池运行状态,双向DC/DC变换器I根据直流母线电压参考值整定流程来调节自适应下垂运行曲线。当锂电池不工作时,双向DC/DC变换器I以最优控制曲线运行控制超级电容输出。当锂电池工作时,双向DC/DC变换器I以充电恢复曲线或者放电恢复曲线运行控制超级电容输出(见图2)。

[0012] (2) 锂电池的双向DC/DC变换器II的控制

[0013] 由于超级电容为功率型储能元件,能量密度低,双向DC/DC变换器II为后级控制,主要维持超级电容的容量在正常工作范围,以间接的方式负责稳定微电网的功率平衡。锂电池的输出控制以超级电容电压作为反馈信息,双向DC/DC变换器II采用锂电池电流-超级电容电压下垂控制方式,控制锂电池向直流母线充放电。

[0014] 本发明具备的主要优点为:

[0015] (1) 锂电池作为后级控制输出,利用超级电容的缓冲作用,锂电池对直流母线电压变化的反应具有一定滞后性,锂电池动作次数将明显降低,并且平滑了输出电流。

[0016] (2) 通过整定直流母线电压参考值,自动调整超级电容自适应下垂控制曲线,避免了由于直流母线允许波动电压带的存在而导致超级电容出现补偿误差。

[0017] (3) 提高锂电池和超级电容级联控制方式的可靠性。

[0018] 本发明有效解决了混合储能系统在直流微电网中锂电池对超级电容有效补偿能量的问题,提供一种直流微电网中混合储能系统改进自适应下垂控制方法。

## 附图说明

[0019] 图1是本发明中直流微电网的简化结构及其混合储能系统并联结构示意图。

[0020] 图2是本发明中双向DC/DC变换器I的自适应下垂运行曲线。

[0021] 最优工作曲线的表达式:充电: $I_{sc} = n_{sc}(U_{dch}-U_{dc})$ ;放电: $I_{sc} = n_{sc}(U_{dc1}-U_{dc})$ ;

[0022] 充电恢复曲线的表达式 $I_{sc} = n_{sc}(U_{dc1}-U_{dc})$ ;

[0023] 放电恢复曲线的表达式( $I_{sc} = n_{sc}(U_{dch}-U_{dc})$ )。

[0024] 图3是本发明中双向DC/DC变换器I的直流母线电压参考值整定流程图。

[0025] 图4是本发明中双向DC/DC变换器II的运行下垂曲线。运行曲线的表达式为:

$$[0026] \quad I_b = \begin{cases} -I_{bm} & U_{sc4} \leq U_{sc} \\ n_b(U_{sc} - U_{sc3}) & U_{sc3} \leq U_{sc} < U_{sc4} \\ 0 & U_{sc2} < U_{sc} < U_{sc3} \\ n_b(U_{sc} - U_{sc2}) & U_{sc1} < U_{sc} \leq U_{sc2} \\ I_{bm} & U_{sc} \leq U_{sc1} \end{cases}$$

[0027] 图1中： $P_{DG}$ 、 $P_{load}$ 分别为分布式电源发出的功率和负荷消耗的功率； $P_b$ 、 $P_{sc}$ 分别为锂电池与超级电容的输出功率， $P_{HES}$ 为混合储能系统输出功率。 $C_{dc}$ 为直流母线电容，锂电池与超级电容通过双向DC/DC变换器同时连接于直流母线上，两者将在直流母线处进行能量交汇。超级电容平抑高频波动，改善电能质量；锂电池将大部分能量直接注入直流母线，对直流微电网的功率削峰填谷，同时通过直流母线为超级电容补偿能量。

[0028] 图2中： $U_{dc}$ 为直流母线电压， $I_{sc}$ 为超级电容输出电流。 $U_{dch}$ 、 $U_{dcl}$ 为直流母线电压允许波动的上下临界值， $U_{dcr}$ 为直流母线电压额定值， $n_{sc}$ 为下垂系数。

[0029] 图3中： $U_{dc}$ 为直流母线电压， $U_{dch}$ 、 $U_{dcl}$ 为直流母线电压允许波动的上下临界值； $U_{sc}$ 为超级电容电压， $U_{sc2}$ 、 $U_{sc3}$ 为超级电容电压最佳工作范围的上下临界值，也为双向DC/DC变换器II的动作阈值； $U_{dc-ref}$ 为双向DC/DC变换器I控制器的直流母线电压参考值。

[0030] 图4中： $U_{sc1}$ 、 $U_{sc2}$ 、 $U_{sc3}$ 、 $U_{sc4}$ 分别为锂电池根据超级电容储能容量而设置的工作临界值； $I_{bm}$ 为锂电池充放电电流限值； $n_b$ 为此下垂关系的下垂系数。

### 具体实施方式

[0031] 一种直流微电网中混合储能系统改进自适应下垂控制方法，基于锂电池和超级电容并联结构，通过DC/DC变换器协调控制储能单元输出。

[0032] 所述锂电池和超级电容分别通过DC/DC变换器I和DC/DC变换器II连接于直流母线上，形成并联结构的混合储能系统。

[0033] 所述DC/DC变换器I、DC/DC变换器II均采用双向Boost-Buck电路结构。

[0034] 一种直流微电网中混合储能系统改进自适应下垂控制方法(该方法是基于本发明所述的直流微电网中锂电池和超级电容并联结构混合储能系统实现的)，包括下述内容：

[0035] (1) 双向DC/DC变换器I为前级控制，使超级电容优先动作；双向DC/DC变换器II后级控制，维持超级电容的容量在正常工作范围，稳定微电网的功率平衡；

[0036] (2) 双向DC/DC变换器I采用超级电容电流-直流母线电压下垂控制方式，控制超级电容向直流母线充放电；所述超级电容电流-直流母线电压下垂控制方式为：设定 $U_{dc}$ 为直流母线电压， $n_{sc}$ 为下垂系数， $U_{dc-ref}$ 为双向DC/DC变换器I控制器的直流母线电压参考值；计算双向DC/DC变换器I控制的超级电容充放电电流 $I_{sc} = n_{sc} (U_{dc-ref} - U_{dc})$ ；

[0037] (3) 双向DC/DC变换器II采用锂电池电流-超级电容电压下垂控制方式，控制锂电池向直流母线充放电，锂电池的输出控制以超级电容电压作为反馈信息；所述锂电池电流-超级电容电压下垂控制方式为：

[0038] 设定 $U_{sc1}$ 、 $U_{sc2}$ 、 $U_{sc3}$ 、 $U_{sc4}$ ，并使得 $U_{sc1} < U_{sc2} < U_{sc3} < U_{sc4}$ ，其中 $U_{sc2}$ 、 $U_{sc3}$ 为超级电容最佳工作电压区间阈值， $U_{sc1}$ 、 $U_{sc4}$ 为超级电容最大工作电压区间临界值。

[0039] 分别为锂电池根据超级电容储能容量而设置的工作临界电压值； $I_{bm}$ 为锂电池充放电电流限值； $n_b$ 为下垂关系的下垂系数；

[0040] 根据锂电池电流-超级电容电压下垂关系，双向DC/DC变换器II控制的锂电池输出电流计算表达式如下：

$$[0041] \quad I_b = \begin{cases} -I_{bm} & U_{sc4} \leq U_{sc} \\ n_b(U_{sc} - U_{sc3}) & U_{sc3} \leq U_{sc} < U_{sc4} \\ 0 & U_{sc2} < U_{sc} < U_{sc3} \\ n_b(U_{sc} - U_{sc2}) & U_{sc1} < U_{sc} \leq U_{sc2} \\ I_{bm} & U_{sc} \leq U_{sc1} \end{cases}$$

[0042] 当超级电容电压 $U_{sc}$ 介于 $U_{sc2}$ 和 $U_{sc3}$ 之间时,双向DC/DC变换器II不工作,减少锂电池的动作次数;

[0043] 当 $U_{sc1} < U_{sc} \leq U_{sc2}$ 时,锂电池根据下垂关系开始放电;

[0044] 当 $U_{sc3} \leq U_{sc} < U_{sc4}$ 时,锂电池进行充电;

[0045] (4) 直流母线电压允许偏差限值为额定电压 $U_{dcr}$ 的 $\pm 5\%$ ;

[0046] 设定 $U_{dch}$ 为直流母线电压允许波动电压带的上临界值, $U_{dc1}$ 为直流母线电压允许波动电压带的下临界值;

[0047]  $U_{dch} = (1+5\%) U_{dcr}$ ,  $U_{dc1} = (1-5\%) U_{dcr}$ ;双向DC/DC变换器I根据直流母线电压参考值整定流程来调节自适应下垂运行曲线;具体调节方法如下:

[0048] 当超级电容保持在最佳运行区间 $U_{sc2} \leq U_{sc} \leq U_{sc3}$ ,且不需要能量补偿时,超级电容将直流母线电压维持在允许波动电压带;

[0049]  $U_{dc} > U_{dch}$ ,则 $U_{dc-ref} = U_{dch}$ ;  $U_{dc} < U_{dc1}$ ,则 $U_{dc-ref} = U_{dc1}$ 。直流母线电压参考值根据直流母线电压波动整定,双向DC/DC变换器I控制超级电容以工作最优曲线(充电: $I_{sc} = n_{sc}(U_{dch} - U_{dc})$ ;放电: $I_{sc} = n_{sc}(U_{dc1} - U_{dc})$ )运行;

[0050] 当锂电池工作时,超级电容作为信息反馈载体,为了避免允许波动电压带使超级电容处于空闲或欠补偿状态,采取如下方法:

[0051]  $U_{sc} > U_{sc3}$ 锂电池充电时,直流母线电压参考值整定值为: $U_{dc-ref} = U_{dch}$ ,双向DC/DC变换器I控制超级电容以放电恢复曲线( $I_{sc} = n_{sc}(U_{dch} - U_{dc})$ )运行;当 $U_{sc} < U_{sc2}$ 锂电池放电时,直流母线电压参考值整定值为: $U_{dc-ref} = U_{dc1}$ ,双向DC/DC变换器I控制超级电容以充电恢复曲线( $I_{sc} = n_{sc}(U_{dc1} - U_{dc})$ )运行。

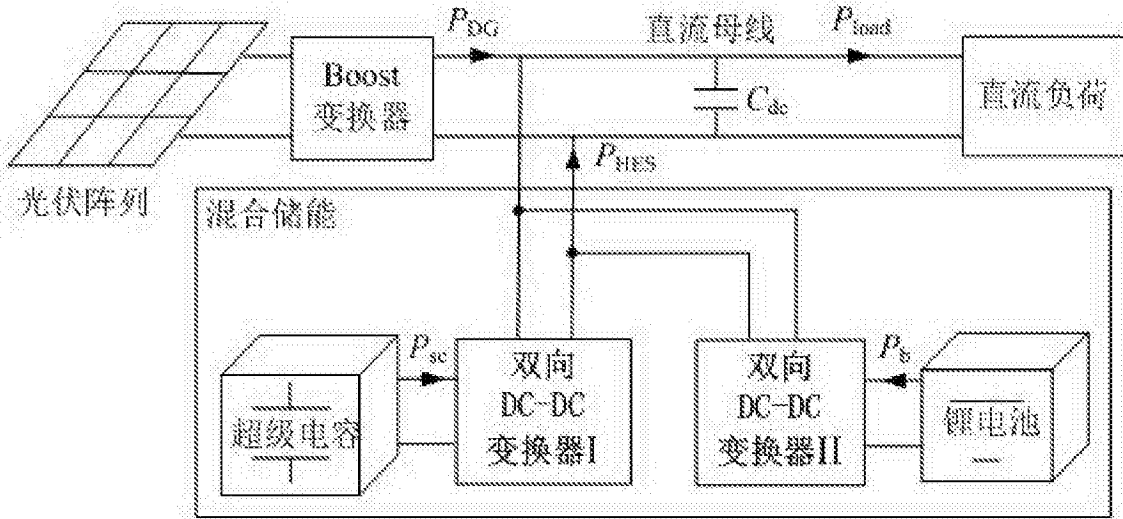


图1

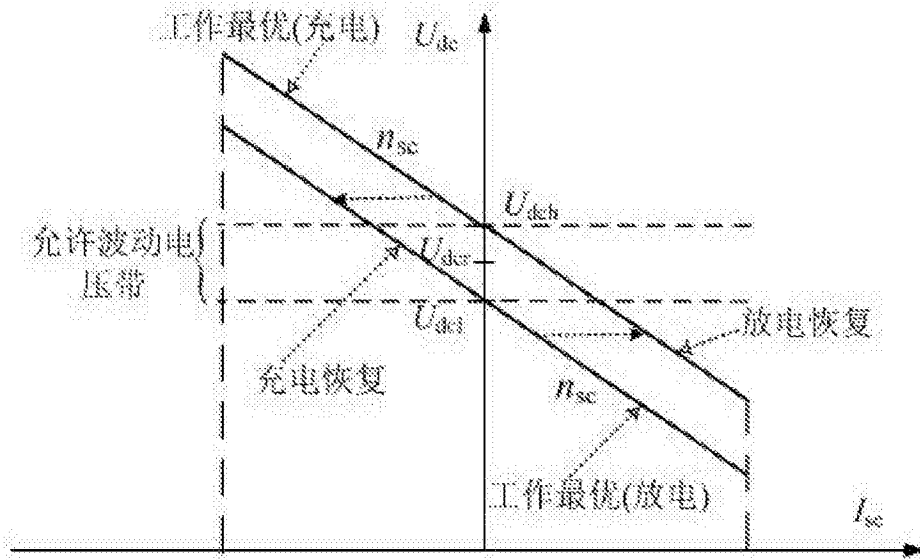


图2



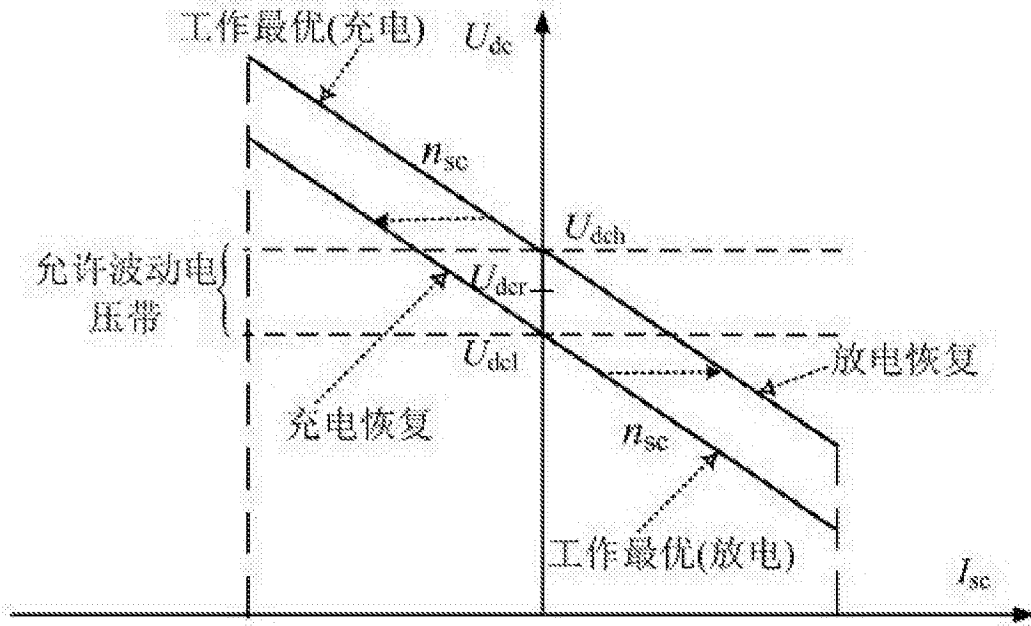


图3

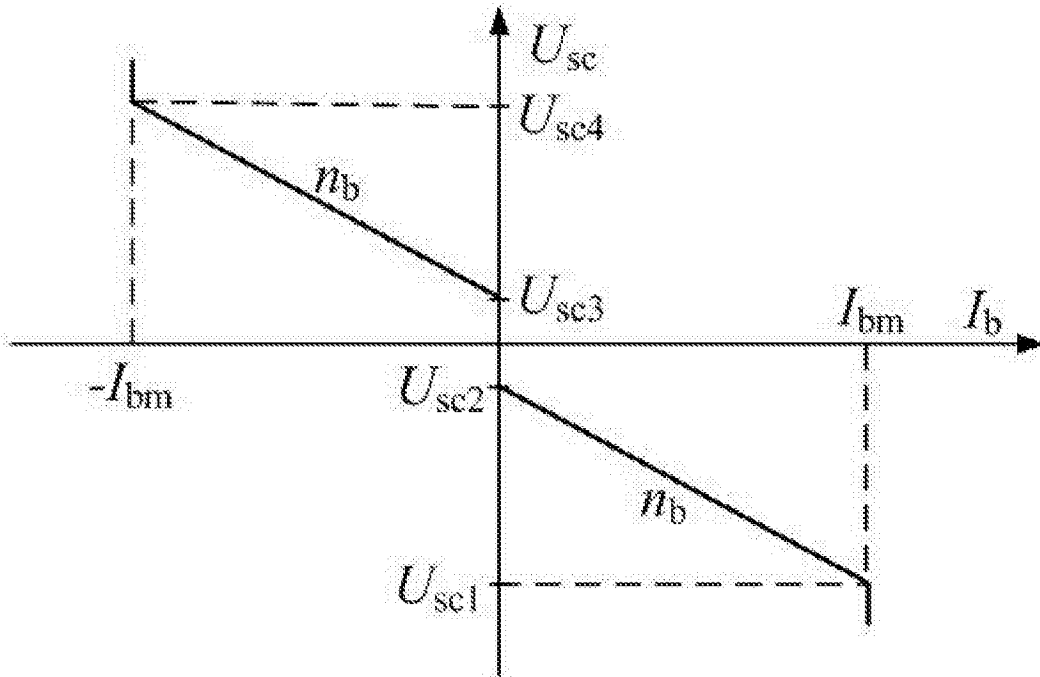


图4