



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106253381 A

(43)申请公布日 2016.12.21

(21)申请号 201610653593.0

(22)申请日 2016.08.10

(71)申请人 渤海大学

地址 121000 辽宁省锦州市松山新区科技  
路19号

(72)发明人 于鹏

(74)专利代理机构 锦州辽西专利事务所 21225

代理人 李辉

(51)Int.Cl.

H02J 7/00(2006.01)

H02J 7/34(2006.01)

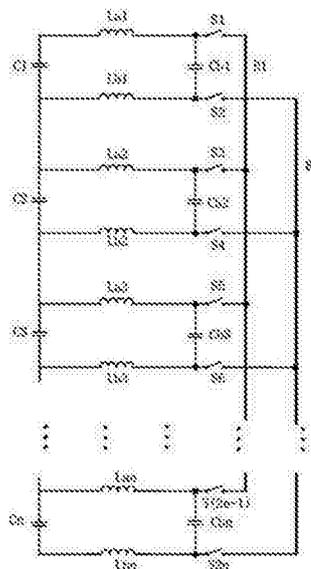
权利要求书2页 说明书11页 附图15页

## (54)发明名称

超级电容串联模组均压电路及均压方法

## (57)摘要

一种超级电容串联模组均压电路及均压方法,解决现有均压电路对采样与控制电路要求高,动态均压效果差,均压效果受能量单体串联数量限制,均压效率低、速度慢,发热多,不利于大规模使用的问题。由超级电容器、均压电容、电感元件、开关元件和母线构成均压电路,均压方法为所有与均压电容相连的开关元件同步运行,即以相同频率、在相同时刻打开或闭合;或者所有与均压电容相连的开关元件不同步运行,即以不相同频率打开或闭合;或者所述开关元件同步运行与不同步运行交替进行。



1. 超级电容串联模组均压电路,其特征是:

设 $n$ 为 $\geq 4$ 的正整数,均压电路由以下元件构成:

超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,共 $n$ 个;

开关元件 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_{2n}$ 共 $2n$ 个;

均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 共 $n$ 个;

电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 共 $n$ 个;

电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 共 $n$ 个;

均压母线 $B_1, B_2$ ;

以上元件以下述网络关系连接:

超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,正极负极首尾相连,串联连接;

电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 一端分别与对应的超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 正极相连,电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 另一端与对应的均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 正极相连;电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 一端与对应的超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 负极相连,电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 另一端与对应的均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 负极相连;

开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-1)}$ 一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 正极相连,另一端与母线 $B_1$ 相连;开关元件 $S_2, S_4, S_6, \dots, S_{2n}$ 一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 负极相连,另一端与母线 $B_2$ 相连。

2. 超级电容串联模组均压电路,其特征是:

设 $n$ 为 $\geq 4$ 的正整数,均压电路由以下元件构成:

超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,共 $n$ 个;

电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 共 $n$ 个;

电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ ,共 $n$ 个;

均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 共 $n$ 个;

开关元件 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{2n-2}$ 共 $2n-2$ 个;

母线 $B_1, B_2$ 共2个;

以上元件组成以下网络关系连接:

设 $n$ 为正整数,超级电容单体 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,正极负极首尾相连,串联连接;

电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 一端与电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 正极相连,电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 另一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 正极相连;

电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 一端与电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 负极相连,电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 另一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 负极相连;

开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-3)}$ 串联接入母线 $B_1$ 中,开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-3)}$ 一端分别与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn-1}$ 正极相连,开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-3)}$ 另一端分别与均压电容 $C_{b2}, C_{b3}, C_{b4}, \dots, C_{bn}$ 正极相连;

开关元件 $S_2, S_4, S_6, S_{(2n-2)}$ 串联接入母线 $B_2$ 中,开关元件 $S_2, S_4, S_6, S_{(2n-2)}$ 一端与均压电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{bn-1}$ 负极相连,开关元件 $S_2, S_4, S_6, S_{(2n-2)}$ 另一端与均压电容 $C_2, C_3, \dots, C_{bn}$ 负极相连。

3. 超级电容串联模组均压方法,其特征是:

3.1)、采用如上所述的超级电容串联模组均压电路;

3.2)、所有与均压电容相连的开关元件同步运行,即以相同频率、在相同时刻打开或闭合;或者所有与均压电容相连的开关元件不同步运行,即以不相同频率打开或闭合;或者所述开关元件同步运行与不同步运行交替进行。

4.如权利要求3所述的超级电容串联模组均压方法,其特征是:

与均压电容相连的开关元件同步运行时,步骤如下:

4.1)、控制模块实时采集串联超级电容单体电压,并计算每支超级电容单体与超级电容单体电压平均值的差值;当差值大于阈值时,则控制模块驱动开关元件以同一频率不断开关动作;

4.2)、开关打开时,均压电容与超级电容通过电感交换电荷;开关闭合时,均压电容组中的均压电容通过开关元件并联,通过电感交换直流电流,电压趋近于一致;

4.3)、当每支超级电容单体与超级电容单体电压平均值的差值小于阈值时,则控制模块将开关元件置位于打开状态;控制模块循环测量超级电容单体电压与超级电容单体电压平均值的差值,重复步骤一。

5.如权利要求3所述的超级电容串联模组均压方法,其特征是:

所述开关元件异步运行时,步骤如下:

5.1)、控制模块首先采集串联连接的超级电容单体电压,选出电压最高和电压最低的超级电容单体,如果极值电压差值超过设定差值,则电压最高的超级电容器单体与电压最低的超级电容器单体对应的开关连续动作,进行电压均衡;

5.2)、开关动作超过设定时间之后,开关停止动作,控制模块重新采集各超级电容器单体电压,选出电压最高和电压最低的超级电容单体,重复步骤一。

6.如权利要求3所述的超级电容串联模组均压方法,其特征是:

所述开关元件同步运行与不同步运行交替进行时,步骤如下:

6.1)、首先由控制模块采集串联连接的超级电容单体电压,通过计算选出电压最高和电压最低的超级电容单体;

6.2)、如果极值电压差值超过超级电容器单体平均电压值的30%,则首先在最高能量的超级电容器单体与最低能量的超级电容器单体之间进行电压均衡,然后再进行同步运行均压。

7.如权利要求4所述的超级电容串联模组均压方法,其特征是:同步运行时阈值为超级电容器单体平均电压值的10%。

8.如权利要求3所述的超级电容串联模组均压方法,其特征是:同步运行时所述开关元件动作速率为10KHZ-1MHZ。

9.如权利要求5所述的超级电容串联模组均压方法,其特征是:不同步运行时,设定差值为串联连接的超级电容单体平均电压值的10%-20%。

## 超级电容串联模组均压电路及均压方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种超级电容均压电路,尤其指采用电感、开关元件、电容组合进行均压的超级电容串联模组均压电路及均压方法。

### 背景技术

[0002] 新能源发电是解决能源问题的重要技术途径。因为可再生能源发电的随机性,储能技术成为制约新能源技术发展的关键技术。

[0003] 在以风能、太阳能等发电出力随机性强的可再生能源接入电网的背景下,储能技术在电力系统中的使用可以提高可再生能源的利用率,提高电能质量,起到稳定电网的关键作用。在电动汽车领域,储能单体集成技术直接决定电动汽车行驶的里程与安全性、可靠性。

[0004] 储能单体集成技术指以电池,超级电容单体为基础,进行组合并控制管理的技术。在储能单体规模使用的过程中还存在着众多制约因素。储能单体的均压技术是电池、超级电容及电动汽车产业研究多年的储能关键技术。本发明提出解决储能单体的均压问题的新方法。

[0005] 储能单体的技术进步中,超级电容技术是具有代表性的技术进展。超级电容又称双电层电容、电化学电容。具有电容量在法拉级、单体耐压低、能量密度低,功率密度高的特点。

[0006] 鉴于超级电容单体耐压等级低、能量密度低的特点,超级电容要存储较多的能量,必须串联连接以模组的模式运行。由于超级电容单体容量和内阻的差异不可避免,串联情况下会出现串联超级电容单体电压不均衡的情况。电压不均衡不加控制将会影响超级电容寿命,也会影响超级电容模组效能。均压问题,已经成为影响超级电容使用安全与运行成本的关键问题。

[0007] 现有超级电容模组存在着体积大、重量重、结构复杂、均压效率低、能量损耗高、均压效果受能量单体串联数量限制大的缺陷,这些缺点制约着储能单体大规模应用。

[0008] 超级电容均压技术已经研究多年,目前超级电容均压技术主要有泄放法、能量转移法两大类。其中能量转移法又分为存储释放法和电源分配法两大类,存储释放法主要有buck/boost法、飞渡电容法、电感法等。电源分配法如正激反激变换器法,多DC/DC转换器法等。

[0009] 泄放法一般通过电阻元件将不均衡电能转换为热能释放,其能量损失大,发热高。

[0010] US 6459236B2中描述了一种使用飞渡电容进行均压的方法。飞渡电容法采用飞渡电容并联在电容模组两侧,通过对模组的采样判断将飞渡电容切换到不同电容单体两端,采用飞渡电容吸收不均衡电荷,释放到低压单体。这种方法的缺点在于均压过程依赖于采样电路,控制困难。而且当单体电压差异缩小时,达到电压均衡时间将会延长,采样与控制更加困难。US7091696B2是在飞渡电容的一个端子上增加了电压变换器,通过开关控制电压变换器切入。但是这种方法需要增加电压变换器单元,电压变换器本身在大电流情况下使

用也存在控制成本、系统复杂性方面的问题。

[0011] EP0900465B1介绍了一种多飞渡电容电池均压技术。这种方法的缺点是多飞渡电容法总是在相邻器件之间交换能量,一方面造成能量损失,另一方面在多超级电容连接时会造成均压时间延长。当串联单体数量众多时,如果电压最高和最低的超级电容器相隔多个单体,将会加大能量损失,降低均衡效率。因为多飞渡电容器均压速度取决于所有飞渡电容器的均压速度,所以当相邻超级电容电压差很小时,整个超级电容模块的均压速度下降。

[0012] EP2312724A1通过用多电容两层分组进行均压,其结构复杂且组间没有均压。

[0013] 多电感法指采用电感储能进行均压的方法,如2003年在第五次电力电子和驱动国际会议发表的会议论文“一种新的电容车电池系统充电均压技术”中提到的多电感法。这种方法的缺点,是电路中的开关难以控制,串联电容数量增多时,均压效果差。

[0014] 如欧洲编号为EP 1081824A2的专利所述BUCK-BOOST变换器法[6],缺点在于当串联单体数量众多时,同样存在不均衡能量损失大,均衡效果差的问题。

[0015] 此外采用变压器均压的方法包括斜坡转换器法,多变压器法,开关变压器法,正激式和反激式变换器法。用变压器的均压方法的共同缺点是磁路复杂,体积较大,绕组不易扩充,可扩展性差,均衡误差大。

[0016] 还存在采用多DC/DC电源的方法,其基本原理一般是将模组两端电压进行DC/DC变换,经过电压变换将超级电容单体与电压源并联,通过控制电压源电压控制单体电压。在大量超级电容串联情况下,电路复杂程度将会增加,串联模组可靠性降低,控制难度大,增加电路成本,高效率电路难以实现。

[0017] 现有均压电路存在以下问题1、均压过程对采样电路与控制电路要求高;2、动态均压效果差;3、泄放多余电荷发热问题难以管理;4、多组串联能量多次存储传递能量损失大,5、均压速度较慢,达到均衡时间长。6、对于采用变压器的均压方法,磁路复杂,体积较大,绕组不易扩充,均衡误差大。

[0018] 超级电容均压方法可以分为泄放法,能量转移法两大类,其中能量转移法又可分为存储释放法和电源分配法两大类。

[0019] 泄放法均压的超级电容存在均压泄放电阻发热问题,能量泄露较多,且导致模组温度上升影响超级电容模组寿命。

[0020] 存储释放法。现有的存储释放法在相邻电容之间用电感或电容做为储能元件存储不均衡电量,将不均衡电量由电压高的单体转移到电压低的单体中去,其以BUCK-BOOST法,开关电容法,飞渡电容法,电感均压法最为典型。对于BUCK-BOOST法,结构复杂成本较高,存在当不均衡电容距离远时,均衡过程能量损耗大的问题,电感均衡法同样只能在相邻的两个电容单元之间转移能量。存在当不均衡电容距离远时,均衡过程能量损耗大的问题

[0021] 开关电容法主要包括飞渡电容法和多飞渡电容法。飞渡电容对超级电容单体依次充放电响应速度慢的问题,这种方法还依赖于高精度的采样电路,实现难度大。多飞渡电容法当串联单体数量众多,不均衡能量需要在不同飞渡电容之间多次传递,能量损失大。

[0022] 采用变压器的均压电路体积,重量增大,磁路复杂,使用不便。

[0023] 多路电源分配法。这种方法普遍存在均压电流、均压速度受DC/DC转换电路制约的缺点。且DC/DC转换电路结构复杂,成本较高,控制难度大。

[0024] 综上所述,现有均压电路存在的问题是:1、难以测量控制。2、难以动态均压。均压

速度较慢,达到均衡时间长。3、均压时间受串联单体数量影响大;4、泄放多余电荷存在发热现象;5、对于采用变压器的均压方法,存在磁路复杂,体积较大,绕组不易扩充,均衡误差大的问题。

## 发明内容

[0025] 本发明提出了一种超级电容串联模组均压电路及均压方法,本发明是基于电容、电感元件与电控开关元件的均压电路,给出了采用新电路结构进行实施的电路方案与控制策略,以解决超级电容单体串联使用的动态均压问题。具体解决现有均压电路对采样与控制电路要求高,动态均压效果差,均压效果受能量单体串联数量限制,均压效率低、速度慢,发热多,不利于大规模使用的缺陷。

[0026] 本发明具有在超级电容静置、充电、放电过程均可以动态均压,电压均衡速度快,均压过程对控制与采样电路依赖低,均压速度受串联电容影响小的特点。本发明不采用泄放电阻与变压器进行电压均衡。

[0027] 本发明的第一种技术方案是:

[0028] 超级电容串联模组均压电路,其特殊之处是:

[0029] 设 $n$ 为正整数,均压电路由以下元件构成:

[0030] 1、超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,共 $n$ 个;

[0031] 2、开关元件 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_{2n}$ 共 $2n$ 个;

[0032] 3、均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 共 $n$ 个;

[0033] 4、电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 共 $n$ 个;

[0034] 5、电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 共 $n$ 个;

[0035] 6、均压母线 $B_1, B_2$ ;

[0036] 以上元件以下述网络关系连接:

[0037] 超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,正极负极首尾相连,串联连接;

[0038] 电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 一端分别与对应的超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 正极相连,电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 另一端与对应的均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 正极相连;电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 一端与对应的超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 负极相连,电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 另一端与对应的均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 负极相连;

[0039] 开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-1)}$ 一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 正极相连,另一端与母线 $B_1$ 相连;开关元件 $S_2, S_4, S_6, \dots, S_{2n}$ 一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 负极相连,另一端与母线 $B_2$ 相连。

[0040] 本发明的第二种技术方案是:

[0041] 超级电容串联模组均压电路,其特征在于:

[0042] 设 $n$ 为 $\geq 4$ 的正整数,均压电路由以下元件构成:

[0043] 1)超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,共 $n$ 个;

[0044] 2)电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 共 $n$ 个;

[0045] 3)电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ ,共 $n$ 个;

[0046] 4)均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 共 $n$ 个;

- [0047] 5)开关元件 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{2n-2}$ 共 $2n-2$ 个;
- [0048] 6)母线 $B_1, B_2$ 共2个;
- [0049] 以上元件组成以下网络关系连接:
- [0050] 设 $n$ 为 $\geq 4$ 的正整数,超级电容单体 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,正极负极首尾相连,串联连接;
- [0051] 电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 一端与电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 正极相连,电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 另一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 正极相连;
- [0052] 电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 一端与电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 负极相连,电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 另一端与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 负极相连;
- [0053] 开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-3)}$ 串联接入母线 $B_1$ 中,开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-3)}$ 一端分别与均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn-1}$ 正极相连,开关元件 $S_1, S_3, S_5, \dots, S_{(2n-3)}$ 另一端分别与均压电容 $C_{b2}, C_{b3}, C_{b4}, \dots, C_{bn}$ 正极相连;
- [0054] 开关元件 $S_2, S_4, S_6, S_{(2n-2)}$ 串联接入母线 $B_2$ 中,开关元件 $S_2, S_4, S_6, S_{(2n-2)}$ 一端与均压电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{bn-1}$ 负极相连,开关元件 $S_2, S_4, S_6, S_{(2n-2)}$ 另一端与均压电容 $C_2, C_3, \dots, C_{bn}$ 负极相连。
- [0055] 该超级电容串联模组均压方法,其特殊之处是:
- [0056] 1、采用如上所述的超级电容串联模组均压电路;
- [0057] 2、所有与均压电容相连的开关元件同步运行,即以相同频率、在相同时刻打开或闭合;或者所有与均压电容相连的开关元件不同步运行,即以不相同频率打开或闭合;或者所述开关元件同步运行与不同步运行交替进行。
- [0058] 进一步地,与均压电容相连的开关元件同步运行时,步骤如下:
- [0059] 1、控制模块实时采集串联超级电容单体电压,并计算每支超级电容单体与超级电容单体电压平均值的差值;当差值大于阈值时,则控制模块驱动开关元件以同一频率不断开关动作;
- [0060] 2、开关打开时,均压电容与超级电容通过电感交换电荷;开关闭合时,均压电容组中的均压电容通过开关元件并联,通过电感交换直流电流,电压趋近于一致;
- [0061] 3、当每支超级电容单体与超级电容单体电压平均值的差值小于阈值时,则控制模块将开关元件置位于打开状态;控制模块循环测量超级电容单体电压与超级电容单体电压平均值的差值,重复步骤一;
- [0062] 进一步地,所述开关元件异步运行时,步骤如下:
- [0063] 1、控制模块首先采集串联连接的超级电容单体电压,选出电压最高和电压最低的超级电容单体,如果极值电压差值超过设定差值,则电压最高的超级电容器单体与电压最低的超级电容器单体对应的开关连续动作,进行电压均衡;
- [0064] 2、开关动作超过设定时间之后,开关停止动作,控制模块重新采集各超级电容器单体电压,选出电压最高和电压最低的超级电容单体,重复步骤一。
- [0065] 进一步地,所述开关元件同步运行与不同步运行交替进行时,步骤如下:
- [0066] 1、首先由控制模块采集串联连接的超级电容单体电压,通过计算选出电压最高和电压最低的超级电容单体;
- [0067] 2、如果极值电压差值超过超级电容器单体平均电压值的30%,则首先在最高能量

的超级电容器单体与最低能量的超级电容器单体之间进行电压均衡,然后再进行同步运行均压。

[0068] 进一步地,同步运行时阈值为超级电容器单体平均电压值的10%。

[0069] 进一步地,同步运行时所述开关元件动作速率为10KHZ-1MHZ。

[0070] 进一步地,不同步运行时,设定差值为串联连接的超级电容平均电压值的10%-20%。

[0071] 进一步地,不同步运行时,设定工作时间为2S~20S。

[0072] 均压电容与超级电容通过电感交换电荷均压,在开关断开阶段,均压电容与超级电容通过电感并联,均压电容与超级电容交换电荷,均压电容之间不交换电荷。在开关闭合阶段,均压电容之间并联并且交换电荷并均衡电压,开关交替运行则电路进行由均压电容中转能量的均压过程。

[0073] 本发明提出的均压电路的有益效果是:

[0074] 1、电路具有均压特性,电路自动将电压高的超级电容单体电荷导出,向电压低的超级电容单体注入电荷,均压过程不需要测量控制系统在每个开关周期进行控制,因此对测量与控制系统要求低,从而降低系统复杂度与成本。

[0075] 2、与现有的均压方法比较,本发明均压速度快,在电容处于充电、放电、静置状态都可以进行动态均压。在开关动作的每一个周期,开关打开期间超级电容与均压电容交换能量,开关闭合期间,均压电容之间交换不均衡能量。不均衡能量转移过程并行进行,因此均压速度与串联电容单体数量相关性小,均压速度快,均压电流大。可以在电容充放电与静置过程中实现实时动态均衡,适用于大容量模组均压。

[0076] 3、本发明无需泄放电阻发热,能量损失小。本发明采用均压电容存储转移超级电容之间差异电荷,均压过程不采用泄放电阻消耗能量发热。

[0077] 4、本发明均衡过程能量转移损失与串联电容数量相关性小。本发明不均衡能量转移通过均压电容并联实现,能量转移过程并行进行,在多组超级电容串联时,当具有电压差距的电容相距较远的时候,均压过程能量损耗主要为电感直流电阻损耗,总值较小。与现有的均压方法比较,转移过程的能量损失与串联电容数量相关性小。

[0078] 除以上优点之外,本发明还具有以下有益效果:

[0079] 1、与现有采用变压器的均压方法比较,本发明系统重量轻。电感不做为储能中转器件使用,因此可以选用重量更轻的器件,而不采用变压器器件,系统重量轻。

[0080] 2、本发明可以采用不同控制策略。本发明控制逻辑灵活性高,既可以采用开环控制策略,也可以采用闭环控制策略。即可以对特定单体进行控制,也可以进行全部单体的同步均压运行。可以根据实际应用情况,提高控制系统性能价格比。

[0081] 3、本发明可以通过高速有效的均压达到提高电容模组可靠性,减少电容失效的效果。

[0082] 4、因为本发明可以根据算法控制只在特定阶段动作,开关损耗小。

[0083] 5、本发明适用灵活性高。因为本发明均压速度、均压效果与超级电容串联数量没有关系。既适合于串联超级电容较多的情况也适用于串联超级电容较少的情况。

## 附图说明

- [0084] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。
- [0085] 图1是本发明第一种方案电路原理图。
- [0086] 图2是本发明第二种方案电路原理图。
- [0087] 图3是第一种方案实施例对应的电路原理图。
- [0088] 图4是本发明控制方法中开关同步动作程序流程图。
- [0089] 图5是本发明控制方法中开关异步动作程序流程图。
- [0090] 图6是本发明控制方法中开关同步异步交替动作程序流程图。
- [0091] 图7是第一种方案静置均压仿真电路原理图。
- [0092] 图8是第一种方案充电均压仿真电路原理图。
- [0093] 图9是第一种方案放电均压仿真电路原理图。
- [0094] 图10是第一种方案静置均压仿真结果示意图。
- [0095] 图11是第一种方案充电均压仿真结果示意图。
- [0096] 图12是第一种方案放电均压仿真结果示意图。
- [0097] 图13、图14、图15为第1种均压电路仿真结果示意图。
- [0098] 图16是第二种方案均压电路静置仿真结果示意图。
- [0099] 图17是第二种方案均压电路充电仿真结果示意图。
- [0100] 图18为第二种方案均压电路放电仿真结果示意图。
- [0101] 图中1、超级电容 $C_1, C_2, C_3, C_4, \dots, C_n$ ;
- [0102] 2、开关元件 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_{2n}$ ; 3、均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, C_{b4}, \dots, C_{bn}$ ;
- 4、电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, L_{a4}, \dots, L_{an}$ ; 5、电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, L_{b4}, \dots, L_{bn}$ ; 6、模组控制器 $U_1$ ; 7、模拟信号线或数字总线 $BUS_1$ ; 8、控制信号连接 $BUS_2$ ; 9、开关驱动模块 $SC_1, \dots, SC_8$ ; 10、隔离驱动模块 $ISOLATOR_1, \dots, ISOLATOR_8$ ; 11、测量模块 $MU_1, \dots, MU_n$ ; 12、控制总线 $databus$ 。

### 具体实施方式

- [0103] 超级电容器串联模组均压电路包括均压部分与控制部分。具体实施时,有多种情况,以下举例二种实施情况。
- [0104] 第一种技术方案:
- [0105] 如图1所示,设 $n$ 为 $\geq 4$ 的正整数,均压电路由以下元件构成:
- [0106] 1、超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,共 $n$ 个;
- [0107] 2、开关元件 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_{2n}$ 共 $2n$ 个;
- [0108] 3、均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots, C_{bn}$ 共 $n$ 个;
- [0109] 4、电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 共 $n$ 个;
- [0110] 5、电感元件 $L_{b1}, L_{b2}, L_{b3}, \dots, L_{bn}$ 共 $n$ 个;
- [0111] 6、均压母线 $B_1, B_2$ ;
- [0112] 以上元件以下述网络关系连接:
- [0113] 超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ,正极负极首尾相连,串联连接;
- [0114] 电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 一端分别与对应的超级电容 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 正极相连,电感元件 $L_{a1}, L_{a2}, L_{a3}, \dots, L_{an}$ 另一端与对应的均压电容 $C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}, \dots,$

Cbn正极相连;电感元件Lb1,Lb2,Lb3,⋯,Lbn一端与对应的超级电容C1,C2,C3,⋯,Cn负极相连,电感元件Lb1,Lb2,Lb3,⋯,Lbn另一端与对应的均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn负极相连;

[0115] 开关元件S1,S3,S5,⋯,S(2n-1)一端与均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn正极相连,另一端与母线B1相连;开关元件S2,S4,S6,⋯,S2n一端与均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn负极相连,另一端与母线B2相连。

[0116] 第二种技术方案:

[0117] 如图2所示,设n为 $\geq 4$ 的正整数,该超级电容器串联模组均压电路由以下元件构成:

[0118] 设n为正整数,均压电路由以下元件构成:

[0119] 1)超级电容C1,C2,C3,⋯,Cn,共n个;

[0120] 2)电感元件La1,La2,La3,⋯,Lan共n个;

[0121] 3)电感元件Lb1,Lb2,Lb3,⋯,Lbn,共n个;

[0122] 4)均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn共n个;

[0123] 5)开关元件S1,S2,S3,⋯,S2n共2n-2个;

[0124] 6)母线B1,B2共2个;

[0125] 以上元件组成以下网络关系连接:

[0126] 设n为正整数,超级电容单体C1,C2,C3,⋯,Cn,正极负极首尾相连,串联连接;

[0127] 电感元件La1,La2,La3,⋯,Lan一端与电容C1,C2,C3,⋯,Cn正极相连,电感元件La1,La2,La3,⋯,Lan另一端与均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn正极相连;

[0128] 电感元件Lb1,Lb2,Lb3,⋯,Lbn一端与电容C1,C2,C3,⋯,Cn负极相连,电感元件Lb1,Lb2,Lb3,⋯,Lbn另一端与均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn负极相连;

[0129] 开关元件S1,S3,S5,⋯,S(2n-3)串联接入母线B1中,开关元件S1,S3,S5,⋯,S(2n-3)一端分别与均压电容Cb1,Cb2,Cb3,⋯,Cbn-1正极相连,开关元件S1,S3,S5,⋯,S(2n-3)另一端分别与均压电容Cb2,Cb3,⋯,Cbn正极相连;

[0130] 开关元件S2,S4,S6,S(2n-2)串联接入母线B2中,开关元件S2,S4,S6,S(2n-2)一端与均压电容C1,C2,C3,⋯,Cbn-1负极相连,开关元件S2,S4,S6,S(2n-2)另一端与均压电容C2,C3,⋯,Cbn负极相连。

[0131] 以上元件构成以下网络关系连接:

[0132] 超级电容单体C1,C2,C3,⋯,Cn,正极负极首尾相连,串联连接;电感元件Lan一端与电容Cn正极相连,电感元件Lan另一端与均压电容Cbn正极相连;电感元件Lbn一端与电容Cn负极相连,电感元件Lbn另一端与均压电容Cbn负极相连。

[0133] 开关元件S(2n-3)串联接入母线B1中,开关元件S(2n-3)一端与均压电容Cbn正极相连,另一端与均压电容Cbn-1正极相连。

[0134] 开关元件S(2n-2)串联接入母线B2中,开关元件S(2n-2)一端与均压电容Cbn负极相连,另一端与均压电容Cbn-1负极相连。

[0135] 下面结合具体实例对本发明详细说明。

[0136] 实施例1

[0137] 对应第一种技术方案,如图3所示,n=4,所述均压电路包括超级电容模块C1、C2、

C3、C4,开关元件S1、S2、S3、S4,均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4,电感元件La1、La2、La3、La4,电感元件Lb1、Lb2、Lb3、Lb4。开关驱动模块SC1、SC2、SC3、SC4、SC5、SC6、SC7、SC8,控制模块U1,信号总线BUS1,控制信号总线databus,隔离模块ISOLATOR1、ISOLATOR2、ISOLATOR3、ISOLATOR4、ISOLATOR5、ISOLATOR6、ISOLATOR7、ISOLATOR8,测量模块MU1,⋯,MU4。

[0138] 超级电容单体C1、C2、C3、C4的正极、负极首尾相连,串联连接。电感元件La1、La2、La3、La4一端分别与电容C1、C2、C3、C4正极相连,电感元件La1、La2、La3、La4另一端分别与均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4正极相连。

[0139] 电感元件Lb1、Lb2、Lb3、Lb4一端分别与电容C1、C2、C3、C4的负极相连,电感元件Lb1、Lb2、Lb3、Lb4另一端分别与均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4负极相连。

[0140] 开关元件S1、S3、S5、S7一端分别与均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4正极相连,开关元件S1、S3、S5、S7另一端与母线B1相连。

[0141] 开关元件S2、S4、S6一端与均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4负极相连,另一端与母线B2相连。

[0142] 控制模块U1通过信号总线BUS1与测量模块MU1,⋯,MU4相连接,通过控制信号线databus分别与隔离模块ISOLATOR1,⋯,ISOLATOR8连接,隔离模块ISOLATOR1,⋯,ISOLATOR8分别与开关驱动模块SC1,⋯,SC8连接。

[0143] 开关驱动模块SC1,⋯,SC8分别与开关元件S1,⋯,S8相连接。

[0144] 控制模块U1具有二个主要功能,一是采集或汇总超级电容单体电压信号、电流信号及温度信号;二是实行具体控制策略,输出开关控制信号,控制均压电路运行。测量模块采集超级电容单体电压之后,通过数据总线将数据传送至控制模块。控制模块实时监测超级电容模组两端电压。

[0145] 隔离模块ISOLATOR,ISOLATOR1,⋯,ISOLATOR8的基本功能就是将开关驱动模块控制信号与控制模块控制信号电气隔离。隔离模块一端与数据线DATABUS相连,另一端与开关驱动模块SC1,⋯,SC8分别相连。

[0146] 开关元件S1,⋯及S8为半导体开关器件如三极管、达林顿管、IGBT、场效应晶体管、可关断晶闸管,本实施例选用三极管。开关器件可以选用元件或元件的组合。不同的开关可以同步动作,也可以根据算法分别动作,以实现均压效果优化。

[0147] 电感元件La1,⋯,La3;Lb1,⋯,Lb3,可以选用不同类型空芯或铁芯电感元件,本实施例选用铁芯电感元件。均压电容元件Cb1,⋯,Cb4可以选用不同类型电容元件,本实施例选用电解电容。电感元件与电容元件均可以选用元件或具有元件特性的元件的组合。

[0148] 实际实施时,本电路可以进一步与计算机监控系统配合使用。

[0149] 以下说明均压系统控制策略:

[0150] 1、在图4所示流程中,开关组同步运行。在此情况下,开关以相同频率,在相同时刻打开或闭合。具体流程是:控制模块实时采集串联超级电容单体电压,实时计算单体电压平均值与每支超级电容单体的差值。当差值大于阈值(阈值根据实际情况设定,本实施例为超级电容器单体平均电压值的10%)时,则控制模块启动方波输出,方波驱动开关元件以同一频率不断开关动作。开关打开时,均压电容与超级电容通过电感交换电荷。开关闭合时,均压电容组中的均压电容通过开关并联,通过电感交换直流电流,电压趋近于一致。当差值小于设定阈值时,则控制模块将开关置位于打开状态。控制模块循环测量超级电容单体电压

与平均值差值。

[0151] 2、在图5所示流程中,开关组异步运行。在此情况下,开关不同时打开或闭合,而由控制模块控制打开或闭合。具体流程是首先采集串联连接的超级电容单体电压,选出电压最高和电压最低的超级电容单体,如果极值电压差值超过设定差值(设定差值范围可根据具体情况设置,其值为串联连接的超级电容本平均电压值的10%-20%,本实施例平均电压为1V,设定差值为0.2V),则电压最高单体与电压最低单体对应的开关连续动作,进行电压均衡。开关动作超过设定时间(设定工作时间由具体工况确定,设定时间可在2S~20S之间选择,本实施例针对10F电容进行均压时,设置为5S)之后,开关停止动作,重新测量各单体电压,选出电压最高和电压最低的超级电容单体。

[0152] 这种模式在具体实施时主要适用于个别单体性能与多数单体差异较大的情况。或者适用于静置阶段,以减少开关损耗。在这种模式下,电压均衡过程依然由电路特性决定,因此也不要求对进行精确测量。

[0153] 3、在图6所示流程图中,开关组同步运行与不同步运行交替。具体流程是,首先由控制模块采集串联连接的超级电容单体电压,通过计算选出电压最高和电压最低的超级电容单体,如果极值电压差值超过平均电压值的30%,说明超级电容单体出现了个体性能差别较大的情况,则首先在最高能量单体与最低能量单体之间进行电压均衡,然后再进行同步运行均压。这种运行方式一方面可以加快模组均压速度,另一方面可以减少开关损耗。

[0154] 根据以上说明,均压电路与控制模块结合,采用以上任意一种控制策略可在超级电容模组不同状态下进行动态均压。

[0155] 以下说明具体实施时不同运行状态的均压原理:

[0156] 在实际使用时,超级电容存在着充电、静置和放电三个基本状态,超级电容模组在运行过程中,通常以这三个基本状态为基础,循环切换。这三个状态包括:

[0157] ①充电状态。外部电源与超级电容模组两端连接,充电过程开始后电荷从外部电源流向超级电容模组。

[0158] ②放电状态。超级电容模组两端与负载连接,放电过程开始后电荷从超级电容模组流向外部负载电路。

[0159] ③静置状态。超级电容电路不与外部电源或负载连接,超级电容模组中单体存在自放电。

[0160] 不同状态的详细原理描述如下:

[0161] ①充电状态。串联超级电容单体存在充电时电压上升速度不一致。这一现象导致最终单体电压不一致。充电阶段,存在超级电容电压高于均压电压情况与超级电容电压低于均压电压情况。

[0162] 超级电容电压高于均压电容电压情况,电压高的超级电容向均压电容放电电流大,超级电容充电电流减小多,减慢超级电容电压上升速度,电压低的超级电容,向均压电容放电慢,超级电容充电电流减小少,在充电过程中实现了对超级电容单体的均压。

[0163] 超级电容电压低于均压电容电压情况,此过程均压电容向超级电容放电。均压电容向电压高的超级电容充电电流小,均压电容向电压低的超级电容充电电流大。在此过程中,电压高的超级电容充电速度减慢,电压低的超级电容充电速度加快。

[0164] 此过程持续,电压差不断减小。

[0165] ②放电状态。由于元件个体差异,超级电容存在放电速度不同,电压不一致的情况,当超级电容电压高于均压电容时,电压较高的超级电容向均压电容充电电流大,超级电容放电速度加快,电压下降加快。电压低的超级电容向均压电容充电电流小,充电速度减慢。电压低的超级电容电压下降速度减慢,电压高的超级电容电压下降速度加快,经过时间积累,电压趋向均衡。

[0166] 对于超级电容电压低于均压电容的情况,电压较高的超级电容,均压电容向其充电电流小,超级电容放电总电流较大,电压下降加快,电压较低的超级电容,均压电容向其充电电流较大,超级电容放电总电流较小,电压下降减慢。经过时间积累,电压趋向均衡。

[0167] ③静置状态。超级电容存在自放电。控制模块监控超级电容单体电压,当超级电容单体电压与平均值之差超出允许范围,控制模块控制开关动作进行均压,当超级电容单体电压差没有超出允许范围,则控制模块控制开关保持断开。

[0168] 超级电容电压高于均压电容电压情况,此情况电压较高的超级电容向均压电容充电电流大,加快电压较高超级电容的电压下降速度,电压较低的超级电容向均压电容充电电流小,减慢电压较低超级电容电压下降速度。

[0169] 超级电容低于均压电容情况,此情况均压电容向电压较高的超级电容充电电流较小,此时超级电容电压升高速度减慢。此情况均压电容向电压较低的超级电容充电电流较大,此时超级电容电压升高速度加快。

[0170] 以下通过仿真实验验证均压电路效果。

[0171] 图7、图8、图9为实施例1均压电路仿真原理。图中超级电容额定值为10F,包括超级电容模块C1、C2、C3、C4;开关S1、S2、S3、S4,S5、S6、S7、S8;均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4;电感元件La1、La2、La3;电感元件Lb1、Lb2、Lb3、Lb4;控制模块U1,信号总线BUS1,控制信号总线databus。超级电容电压分别为U1、U2、U3、U4。

[0172] 超级电容单体C1、C2、C3、C4,正极负极首尾相连,串联连接。

[0173] 以 $n(=1、2、3、4)$ 为元件序号,其它元件的连接方式为:

[0174] 电感元件 $L_{an}$ 一端与电容 $C_n$ 正极相连,电感元件 $L_{an}$ 另一端与均压电容 $C_{bn}$ 正极相连。电感元件 $L_{bn}$ 一端与电容 $C_n$ 负极相连,电感元件 $L_{bn}$ 另一端与均压电容 $C_{bn}$ 负极相连。开关元件 $S(2n-1)$ 一端与均压电容 $C_{bn}$ 正极相连,另一端与母线B1相连。开关元件 $S_{2n}$ 一端与均压电容 $C_{bn}$ 负极相连,另一端与母线B2相连。

[0175] 超级电容C1容值为 $10\mu\text{F}$ 、C2容值为 $10.3\mu\text{F}$ 、C3容值为 $10.6\mu\text{F}$ 、C4容值为 $11\mu\text{F}$ ;均压电容Cb1、Cb2、Cb3、Cb4值均为 $4000\mu\text{F}$ ;均压电感La1、La2、La3、La4与均压电感Lb1、Lb2、Lb3、Lb4值均为 $1.4\mu\text{H}$ ;开关S1、S2、S3、S4,S5、S6、S7、S8开关频率为 $100\text{kHz}$ 。

[0176] 其中图7为实施例1均压电路静置仿真原理图。图中串联电容组TA、TB端开路。

[0177] 图8为实施例1均压电路充电仿真原理图。图中串联电容组TA、TB端接入5A电流源为串联超级电容组充电。

[0178] 图9为实施例1均压电路放电仿真原理图。图中串联电容组TA、TB端接入 $1\Omega$ 电阻作为负载放电。

[0179] 图13、图14、图15为第1种均压电路仿真结果。图中‘\*’线代表C1电压U1,‘+’线代表C2电压U2,‘.’线代表C3电压U3,‘o’线代表C4电压U4。

[0180] 图13为第1种均压电路静置仿真结果。结果表明,超级电容电压U1、U2、U3、U4,分别

由初值2.9V、2.6V、2.32V、2.1V在4S处均压到2.45V。

[0181] 图14为第1种均压电路充电仿真结果。结果表明,超级电容电压U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>,分别由初值0V、0.2V、0.4V、0.6V在3S处电压一致为1.7V,之后电压一致上升。

[0182] 图15为第1种均压电路放电仿真结果,其中超级电容电压U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>,分别由初值3V、2.6V、2.3V、2V在3S处电压一致为0.7V,之后电压一致下降。

[0183] 图16显示第2种均压电路静置仿真结果。结果表明,超级电容电压U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>,分别由初值3V、2.5V、2.0V、1.5V在4S处均压到2.45V。

[0184] 实施例2

[0185] 对应第二种技术方案,图10、图11、图12为第二种技术方案对应的均压电路仿真原理图。图中超级电容额定值为10F,包括超级电容模块C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>;开关S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>、S<sub>6</sub>;均压电容C<sub>b1</sub>、C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>、C<sub>b4</sub>;电感元件L<sub>a1</sub>、L<sub>a2</sub>、L<sub>a3</sub>;电感元件L<sub>b1</sub>、L<sub>b2</sub>、L<sub>b3</sub>、L<sub>b4</sub>;控制模块U<sub>1</sub>,信号总线BUS<sub>1</sub>,控制信号总线databus。超级电容电压分别为U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>。

[0186] 超级电容单体C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>,正极负极首尾相连,串联连接。

[0187] 电感元件L<sub>a1</sub>、L<sub>a2</sub>、L<sub>a3</sub>、L<sub>a4</sub>一端分别与电容C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>正极相连,电感元件L<sub>a1</sub>、L<sub>a2</sub>、L<sub>a3</sub>、L<sub>a4</sub>另一端分别与均压电容C<sub>b1</sub>、C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>、C<sub>b4</sub>正极相连。

[0188] 电感元件L<sub>b1</sub>、L<sub>b2</sub>、L<sub>b3</sub>、L<sub>b4</sub>一端分别与超级电容C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>负极相连,电感元件L<sub>b1</sub>、L<sub>b2</sub>、L<sub>b3</sub>、L<sub>b4</sub>另一端分别与均压电容C<sub>b1</sub>、C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>、C<sub>b4</sub>负极相连。

[0189] 开关元件S<sub>1</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>5</sub>串联接入母线B<sub>1</sub>中,开关元件S<sub>1</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>5</sub>一端分别与均压电容C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>、C<sub>b4</sub>正极相连,另一端分别与均压电容C<sub>b1</sub>、C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>正极相连。开关元件S<sub>2</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>6</sub>串联接入母线B<sub>2</sub>中,开关元件S<sub>2</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>6</sub>一端与均压电容C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>、C<sub>b4</sub>负极相连,另一端与均压电容C<sub>b1</sub>、C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>负极相连。

[0190] 不同状态的详细原理及控制策略与实施例1相同。

[0191] 超级电容C<sub>1</sub>容值为10 $\mu$ F、C<sub>2</sub>容值为10.3 $\mu$ F、C<sub>3</sub>容值为10.6 $\mu$ F、C<sub>4</sub>容值为11 $\mu$ F;均压电容C<sub>b1</sub>、C<sub>b2</sub>、C<sub>b3</sub>、C<sub>b4</sub>值均为4000 $\mu$ F;电感元件L<sub>a1</sub>、L<sub>a2</sub>、L<sub>a3</sub>、L<sub>a4</sub>与电感元件L<sub>b1</sub>、L<sub>b2</sub>、L<sub>b3</sub>、L<sub>b4</sub>值均为1.4 $\mu$ H;开关S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>、S<sub>6</sub>开关频率为100kHz。

[0192] 其中图10为本实施例的均压电路静置仿真原理图。串联电容组TA、TB端开路。

[0193] 图11为本实施例的均压电路充电仿真原理图。串联电容组TA、TB端接入5A电流源为串联超级电容组充电。

[0194] 图12为本实施例的均压电路放电仿真原理。串联电容组TA、TB端接入1 $\Omega$ 电阻作为负载放电。

[0195] 图17为本实施例均压电路充电仿真结果。结果表明,超级电容电压U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>,分别由初值0V、0.2V、0.4V、0.6V在3S处电压一致为1.7V,之后电压一致上升。

[0196] 图18为本实施例均压电路放电仿真结果,其中超级电容电压U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>,分别由初值3V、2.5V、2V、1.5V在10S处电压一致为0.1V,之后电压一致下降至放电结束。

[0197] 由图10至图18所示结果表明,本发明提出的均压电路在超级电容组静置、充电和放电的状态下均具有动态均压效果。

[0198] 以上仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

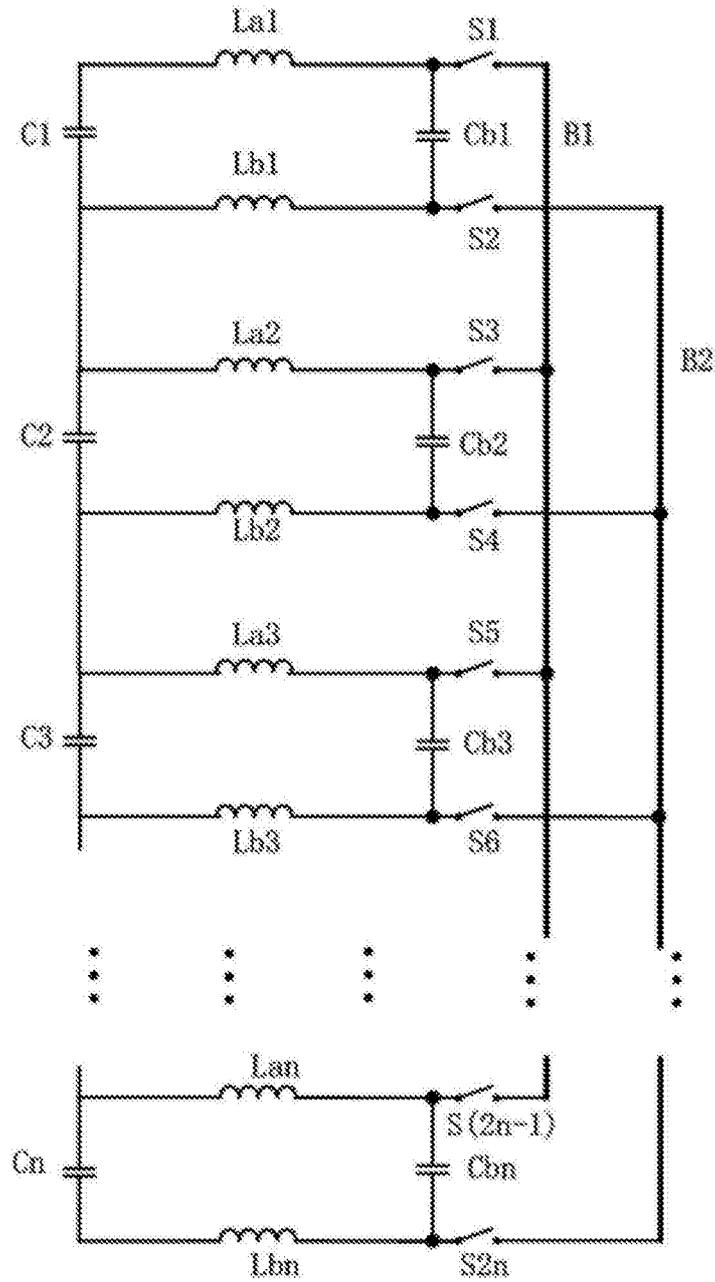


图1

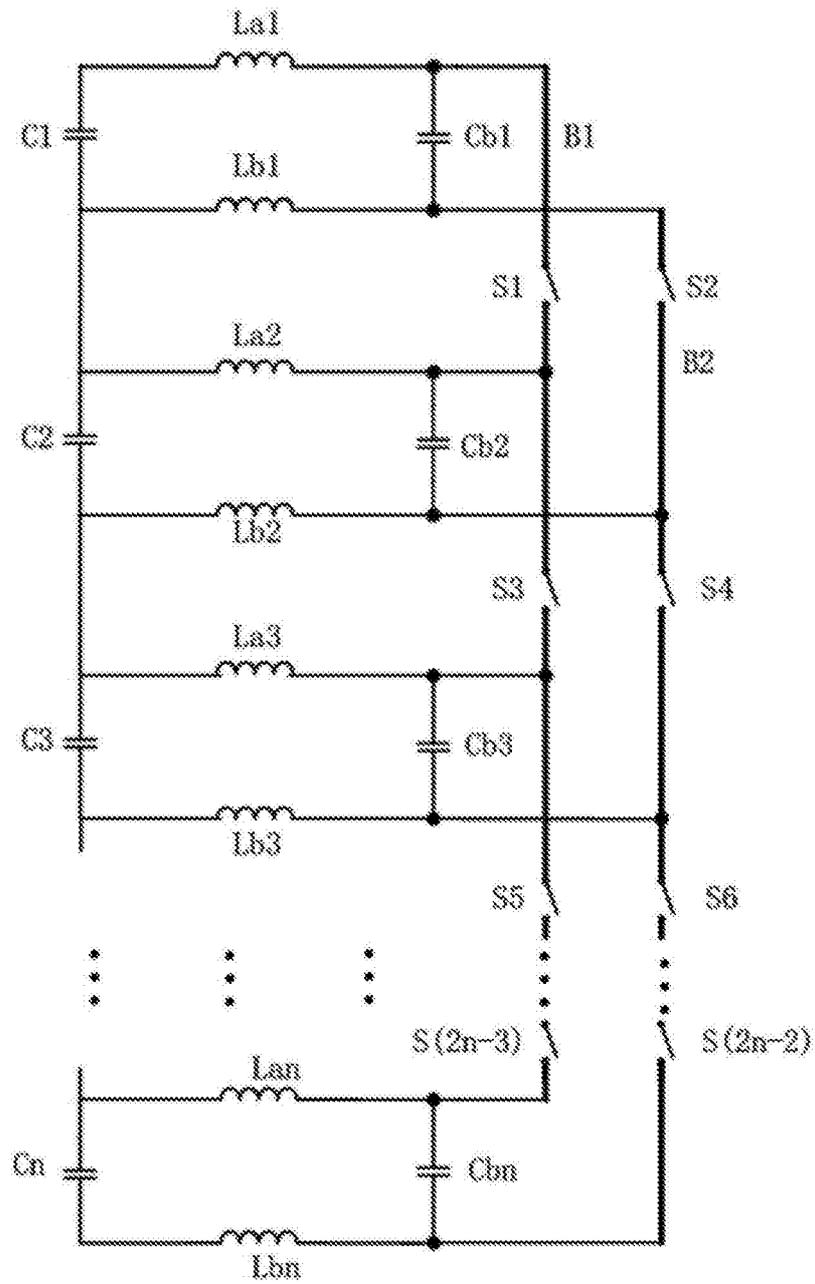


图2

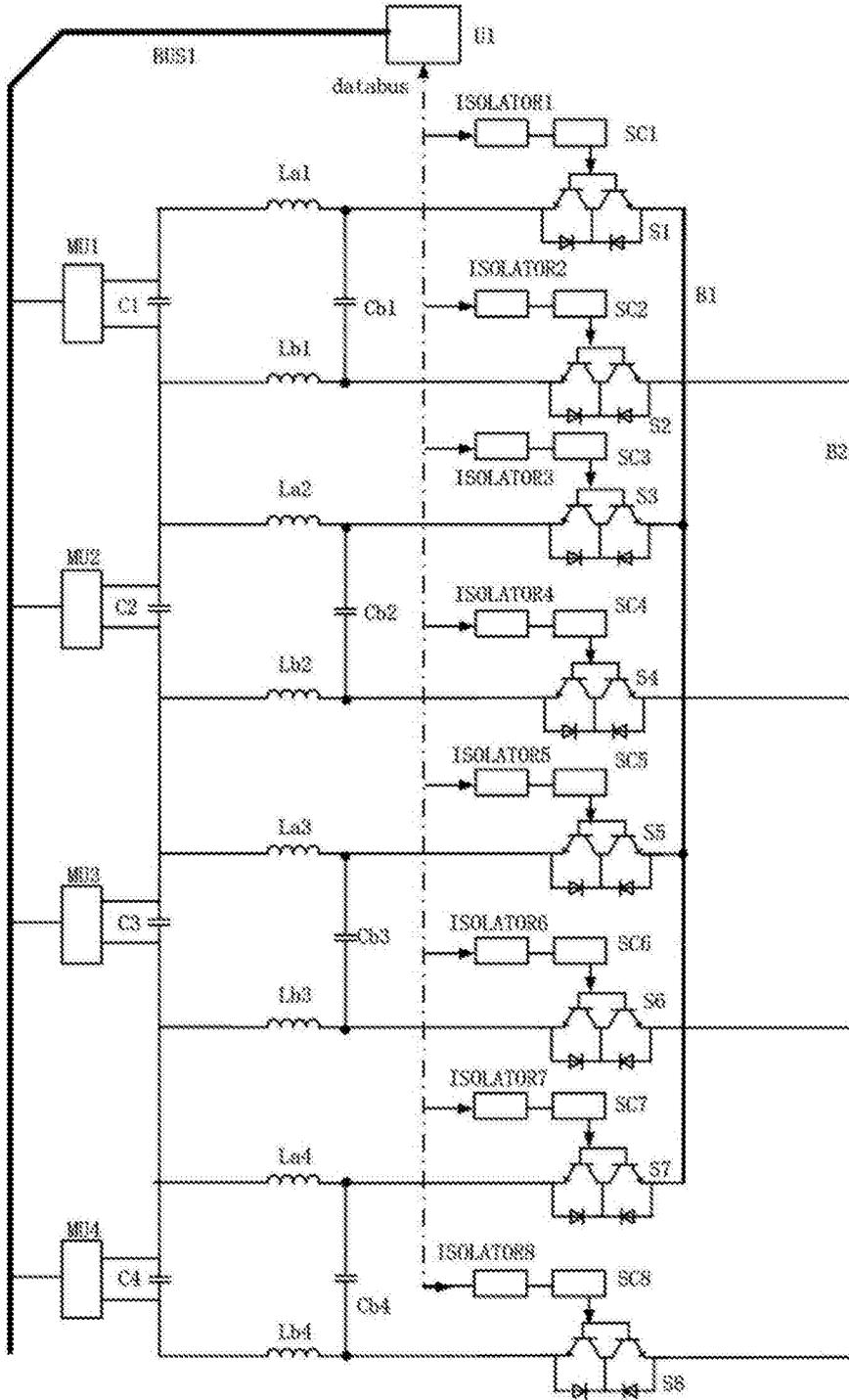


图3

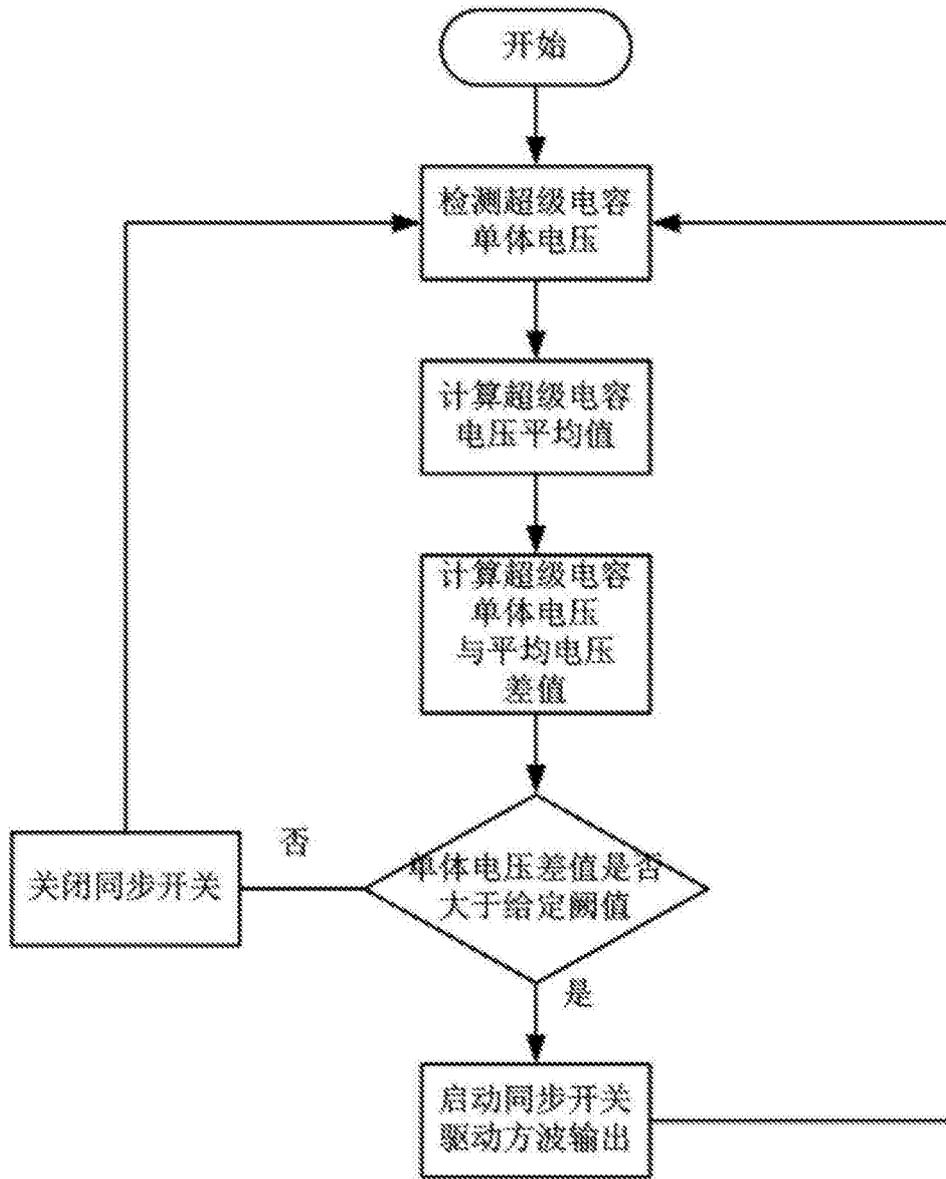


图4

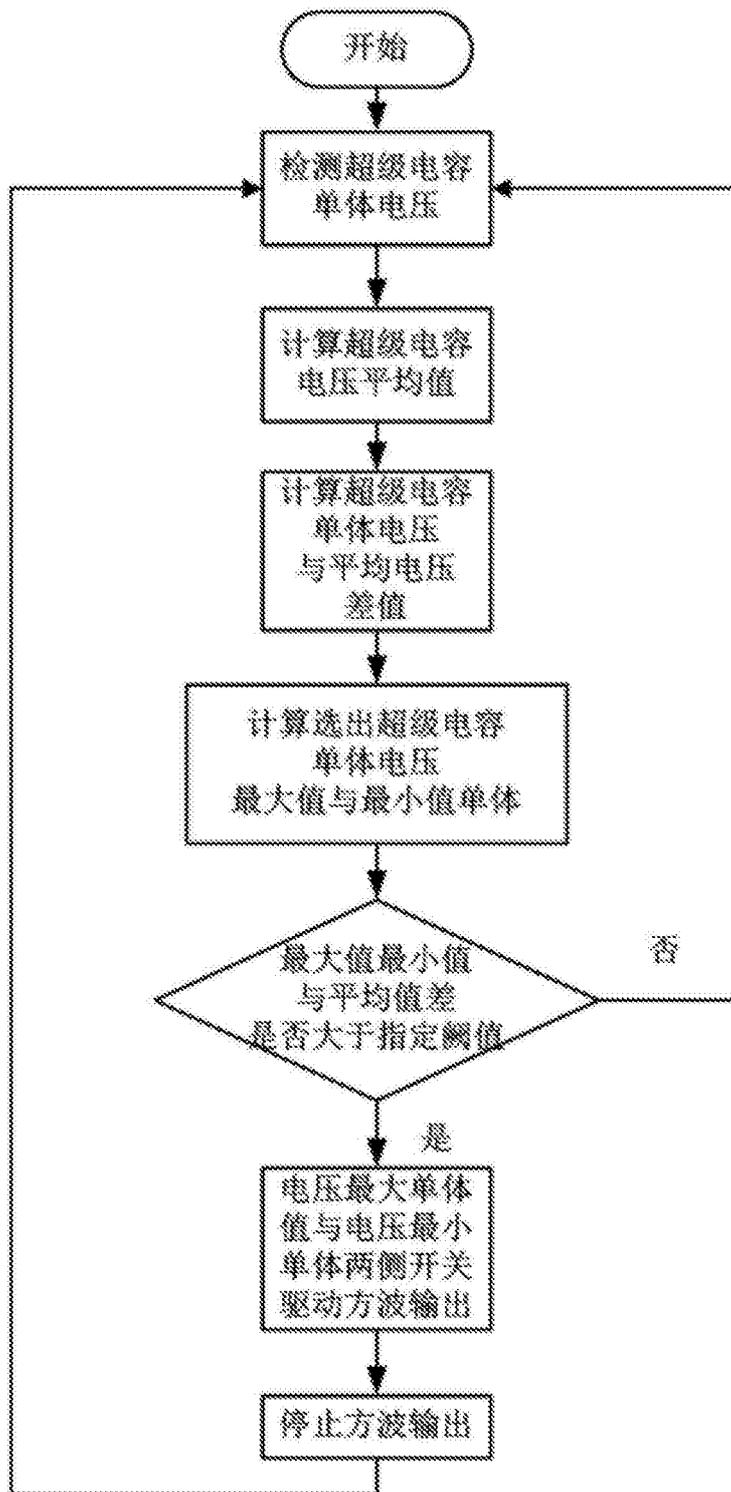


图5

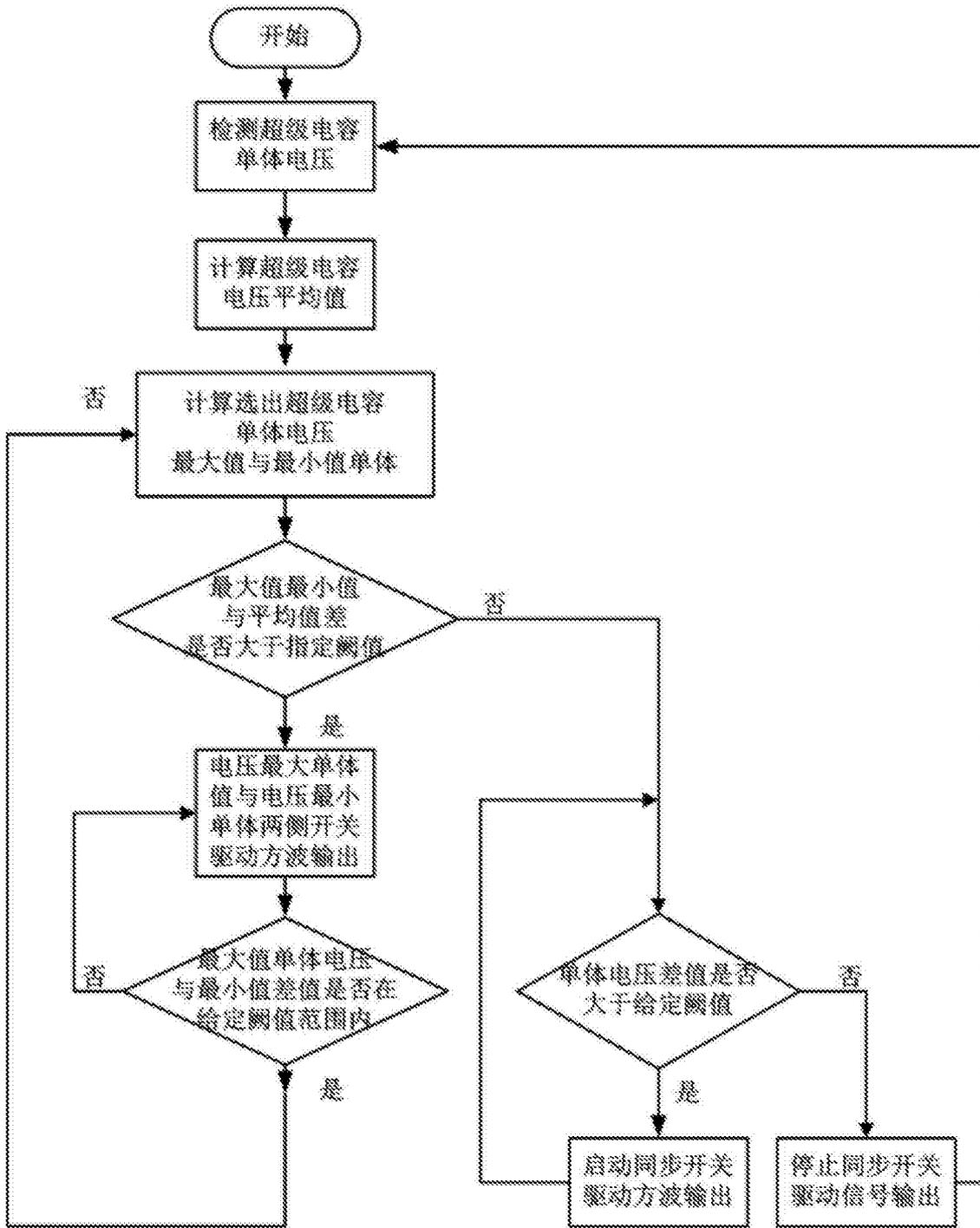


图6

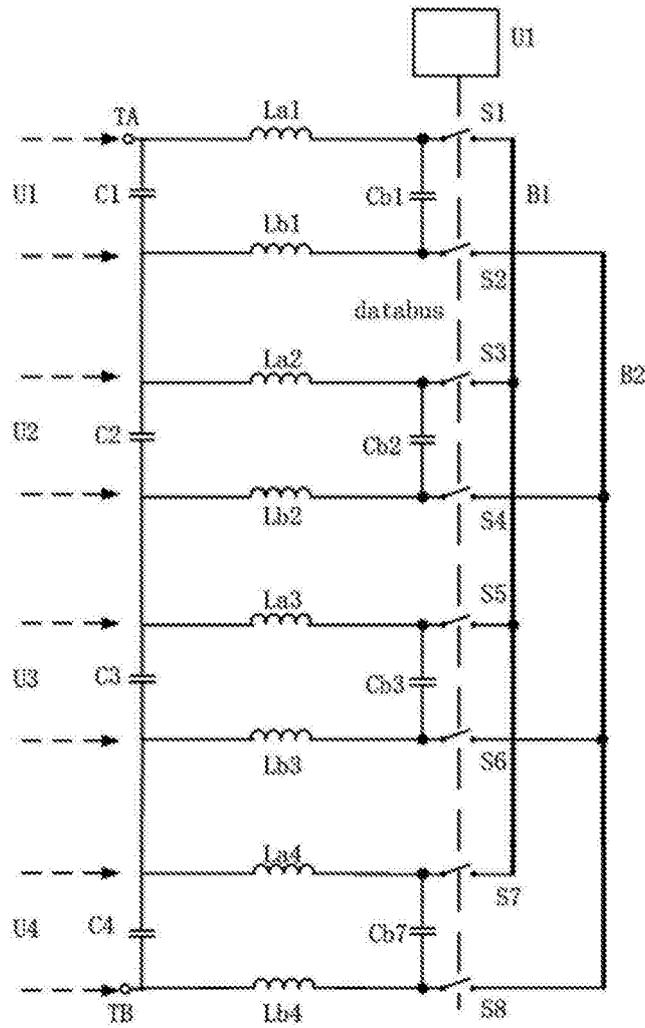


图7

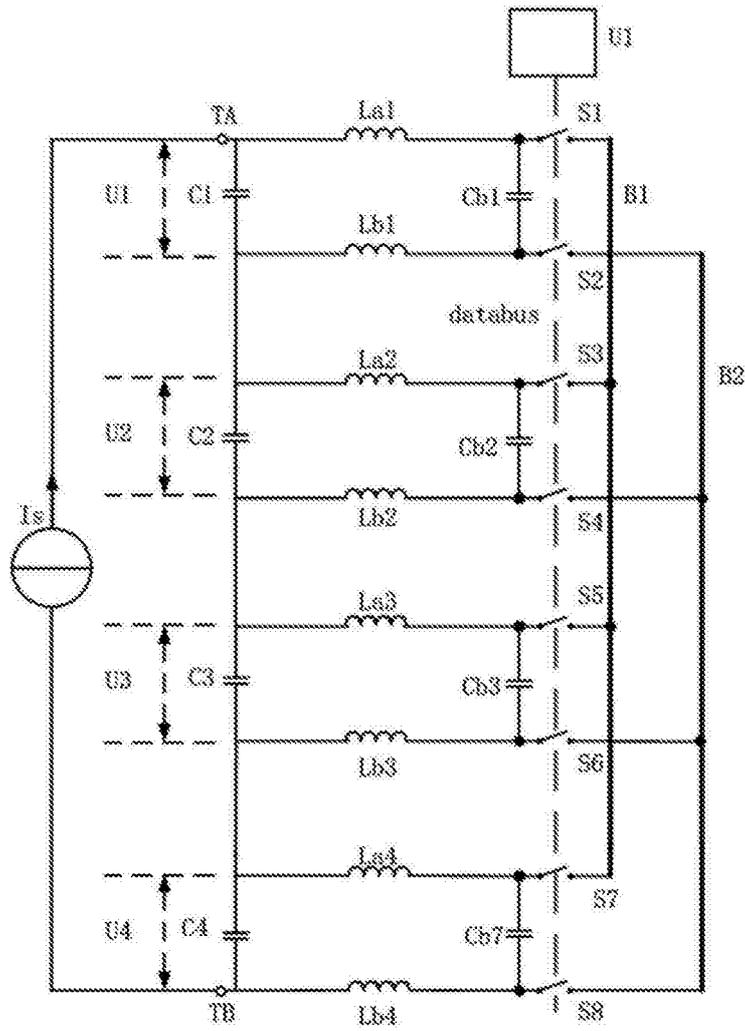


图8

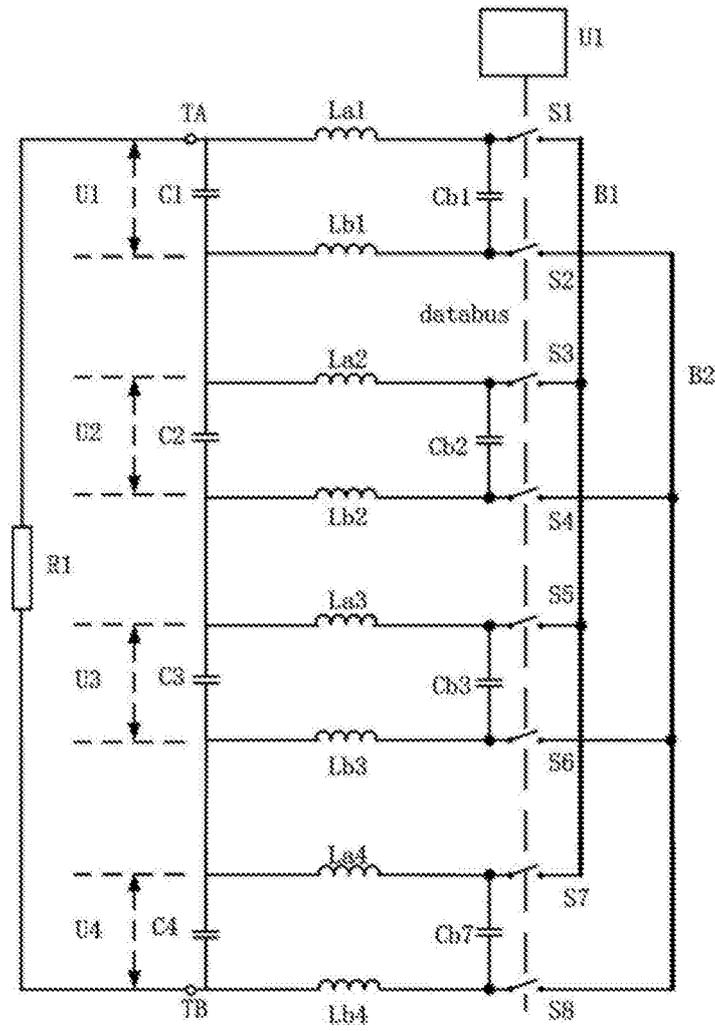


图9

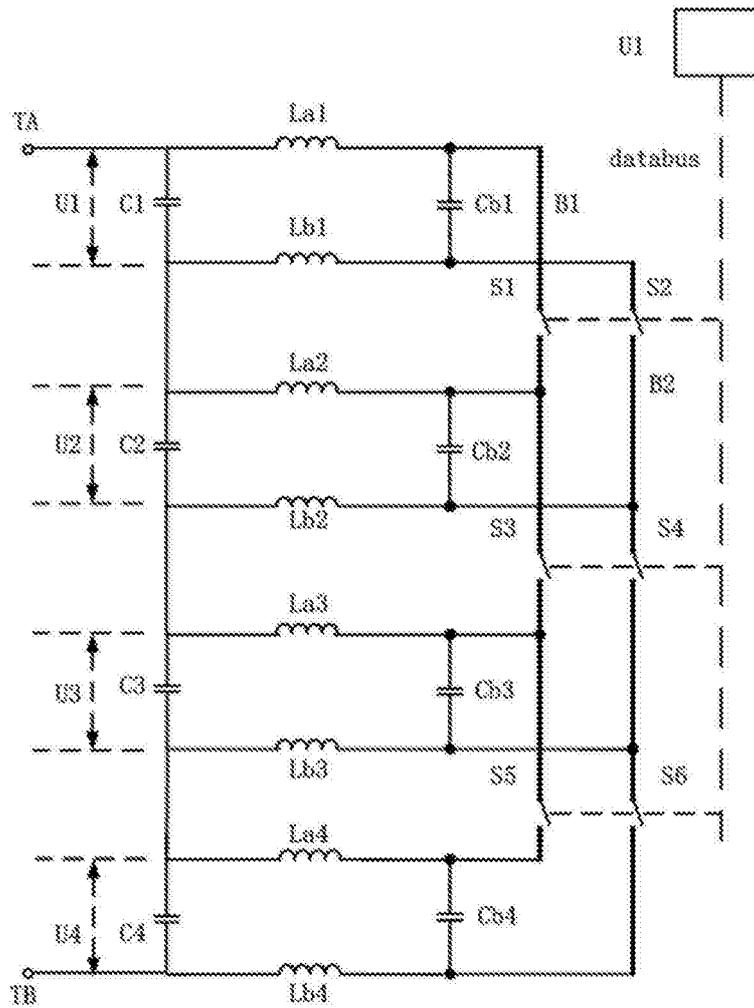


图10

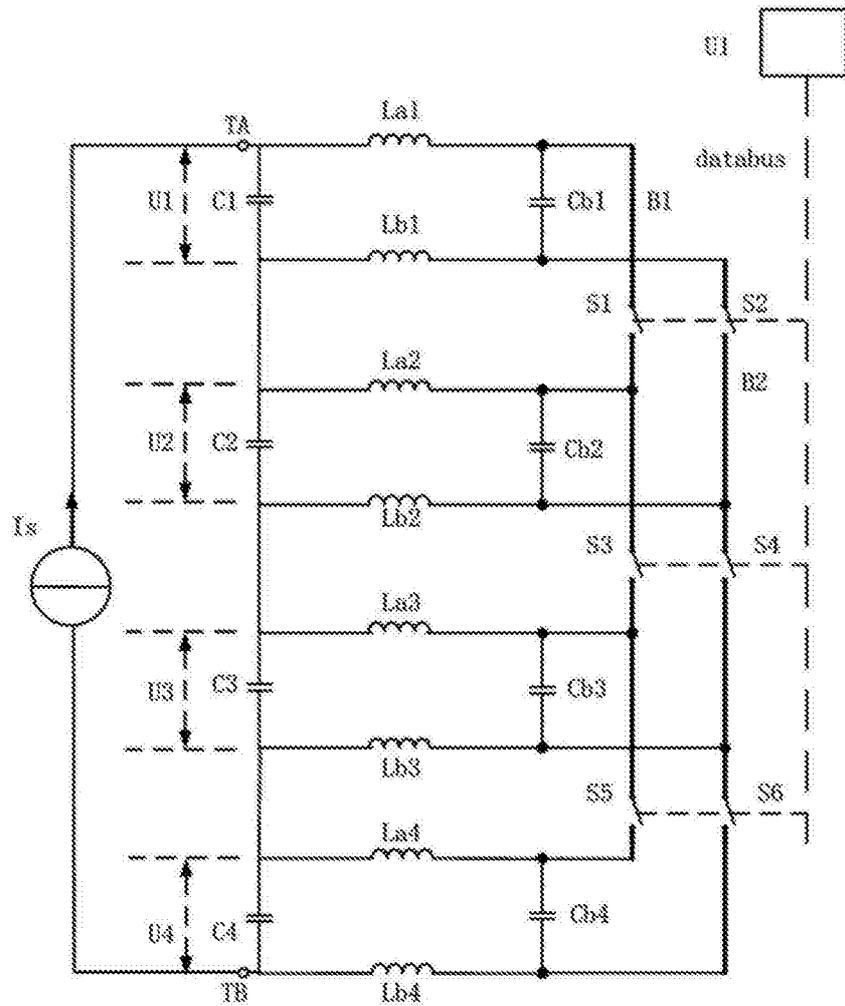


图11

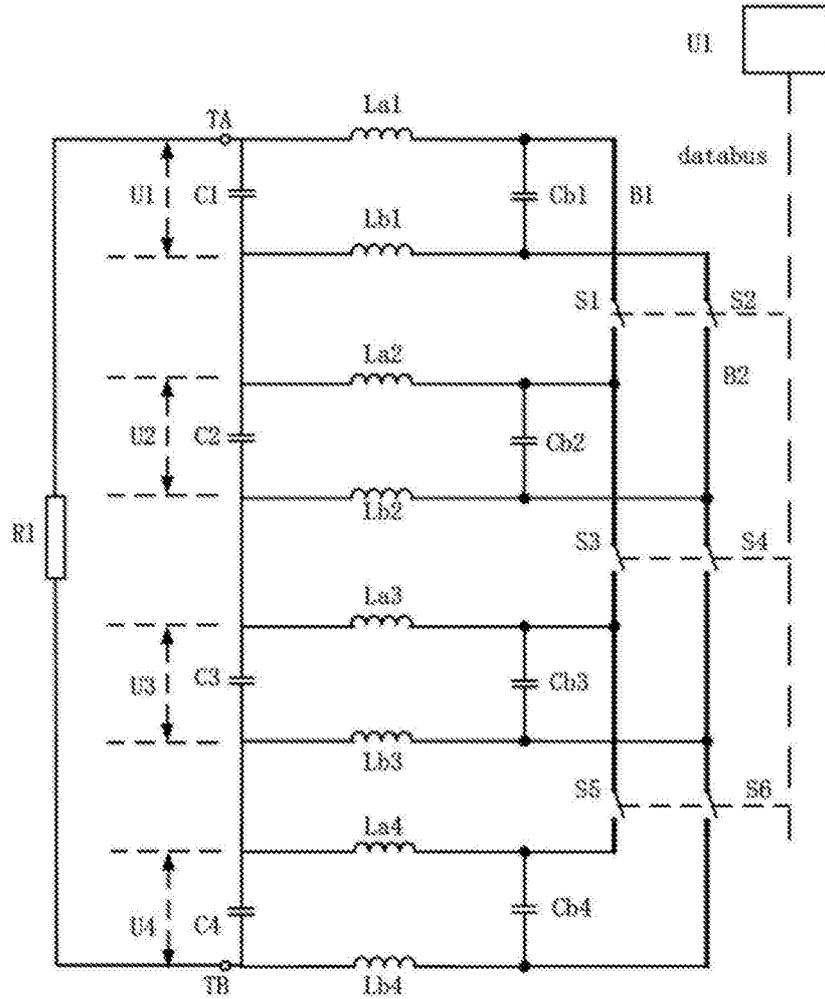


图12

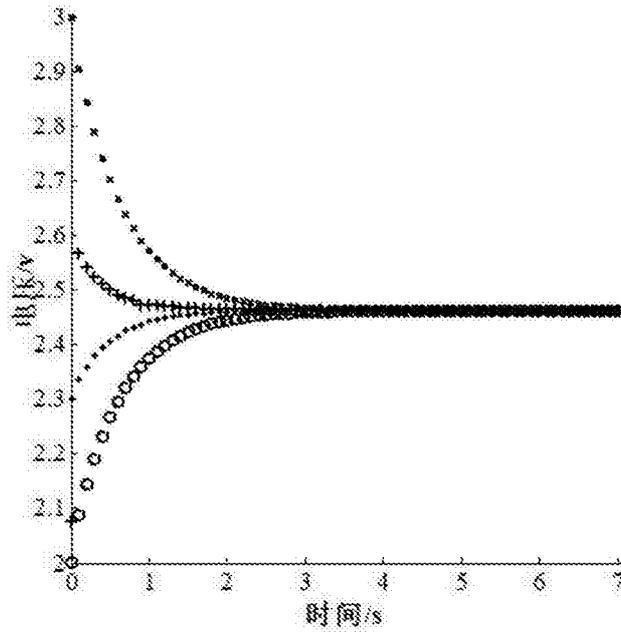


图13

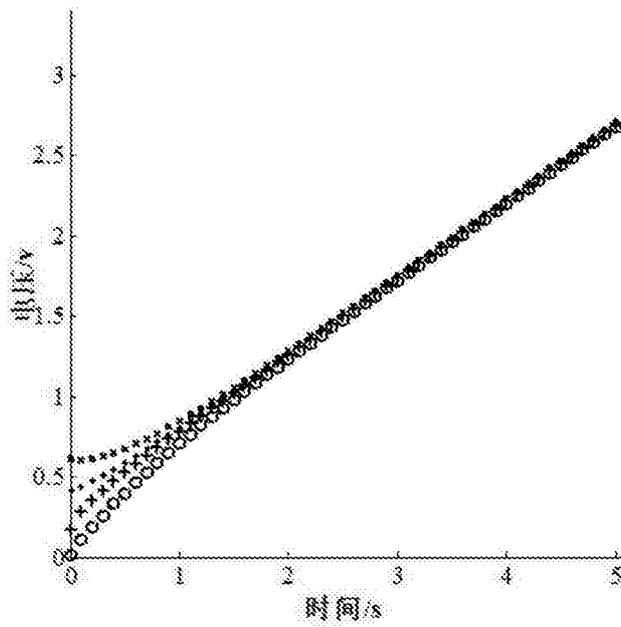


图14

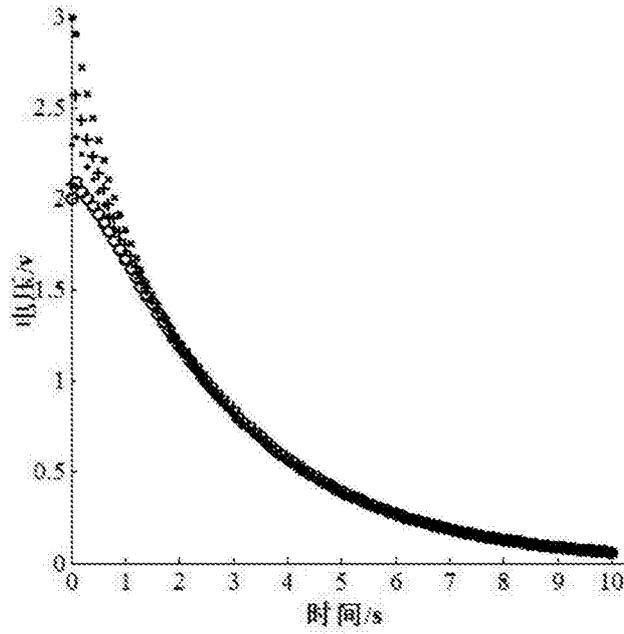


图15

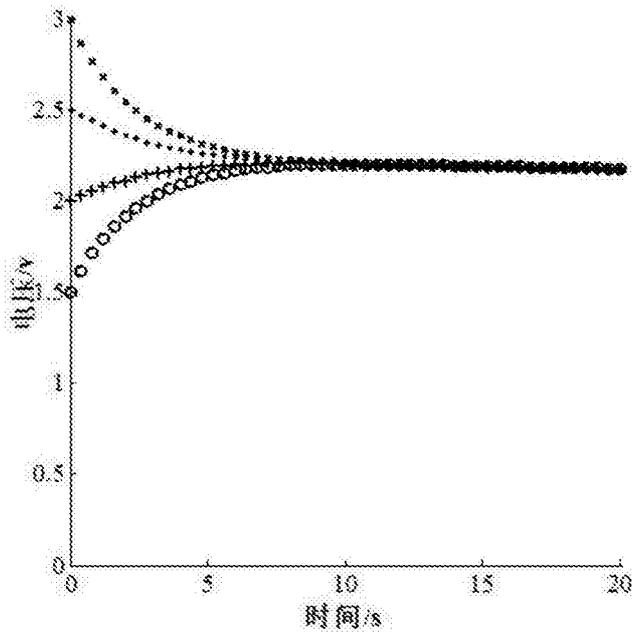


图16

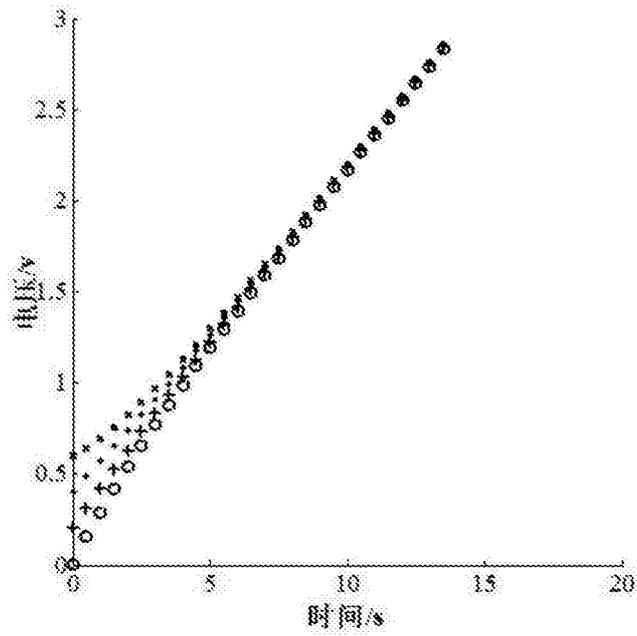


图17

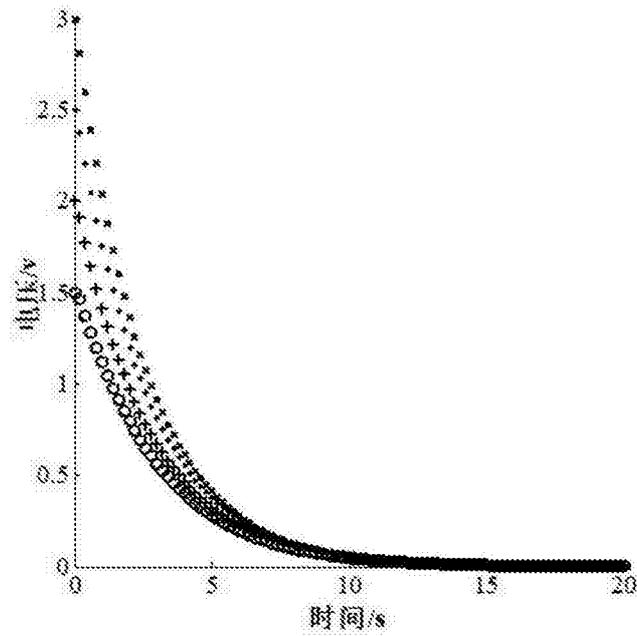


图18