



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106921209 B

(45)授权公告日 2020.08.04

(21)申请号 201511005345.7

H01M 10/44(2006.01)

(22)申请日 2015.12.28

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106921209 A

CN 103855775 A, 2014.06.11

CN 203859547 U,2014.10.01

CN 102364811 A.2012.02.29

(43)申请公布日 2017.07.04

审查员 肖高

(73)专利权人 上海中科深江电动车辆有限公司

地址 201821 上海市嘉定区叶城路1631号

(72)发明人 张陈斌 肖欣 孙江明 林利

徐冲 李祖喜 杨士保 张兴旺

杨钢

(74)专利代理机构 北京同立钧成知识产权代理

有限公司 11205

代理人 杨贝贝 黄健

(51) Int.Cl.

H02J 7/34(2006.01)

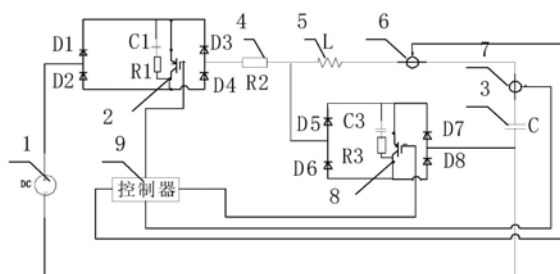
权利要求书2页 说明书18页 附图4页

(54)发明名称

充电电路及充电方法

(57)摘要

本发明提供一种充电电路及充电方法,该充电电路包括:直流恒压源、第一开关管、第二电阻、电感、电流互感器、电压检测装置、超级电容器、第二开关管以及控制器,控制器根据电流互感器获得的超级电容器的充电电路,以及电压检测装置获得的超级电容两端的电压,产生第一路脉冲以控制第一开关管的导通或关断,产生第二路脉冲以控制第二开关管的导通或关断。采用本发明实施例所述的充电电路,在RLC恒压充电模式下对超级电容器进行充电,通过采用互补脉冲触发第一开关管及第二开关管开实现对超级电容器充电的控制,该充电电路共用两个开关管,使用器件少。



1. 一种充电电路,其特征在于,包括:直流恒压源、第一开关管、第二电阻、电感、电流互感器、电压检测装置、超级电容器、第二开关管以及控制器,其中,

所述直流恒压源的正极与所述第一开关管的输入端连接,所述第一开关管的输出端与所述第二电阻的第一端连接,所述第二电阻的第二端与所述电感的第一端连接,所述电感的第二端与所述电流互感器的输入端连接,所述电流互感器的输出端与所述电压检测装置的输入端连接,所述电压检测装置的输出端与所述超级电容器的第一端连接,所述超级电容器的第二端与所述直流恒压源的负极连接;

所述电流互感器用于检测所述超级电容器的充电电流,所述电压检测装置用于检测所述超级电容器两端的电压;

所述第二电阻的第二端还与所述第二开关管的输入端连接,所述超级电容器的第二端还与所述第二开关管的输出端连接;

所述控制器的输入端与所述电流互感器的输出端以及所述电压检测装置的输出端连接,所述控制器的输出端与所述第一开关管的控制端以及所述第二开关管的控制端连接,用于根据所述电流互感器获得的所述超级电容器的充电电流,以及所述电压检测装置获得的所述超级电容两端的电压,产生第一路脉冲与第二路脉冲,所述第一路脉冲用于控制所述第一开关管的导通或关断,所述第二路脉冲用于控制所述第二开关管的导通或关断,所述第一路脉冲与所述第二路脉冲为互补脉冲;

若超级电容两端的电压超过第一电压阈值,且所述超级电容的充电电流小于第一电流阈值,则所述控制器产生的所述第一路脉冲为关断触发脉冲,使得所述第一开关管关断,所述控制器产生的所述第二路脉冲为导通触发脉冲,使得所述第二开关管导通;

若所述超级电容两端的电压小于第二电压阈值,且所述超级电容的充电电流大于第二电流阈值,则所述控制器产生的所述第一路脉冲为导通触发脉冲,使得所述第一开关管导通,所述控制器产生的所述第二路脉冲为关断触发脉冲,使得所述第二开关管关断。

2. 根据权利要求1所述的充电电路,其特征在于,所述第一开关管还设置第一保护电路,所述第一保护电路包括:第一二极管、第二二极管、第三二极管、第四二极管、第一电阻以及第一电容,所述第一二极管、所述第二二极管、所述第三二极管以及所述第四二极管并联在所述第一开关管的输入端与输出端;

所述第一电阻与所述第一电容串联后并联在所述第一开关管的输入端与输出端。

3. 根据权利要求1或2所述的充电电路,其特征在于,所述第二开关管还设置第二保护电路,所述第二保护电路包括:第五二极管、第六二极管、第七二极管、第八二极管、第三电阻以及第三电容,所述第五二极管、所述第六二极管、所述第七二极管以及所述第八二极管并联在所述第二开关管的输入端与输出端;

所述第三电阻与所述第三电容串联后并联在所述第二开关管的输入端与输出端。

4. 根据权利要求1或2所述的充电电路,其特征在于,所述第一开关管与所述第二开关管均为全控型器件。

5. 根据权利要求4所述的充电电路,其特征在于,所述全控型器件包括:绝缘栅双极型晶体管、门极可关断晶闸管。

6. 一种采用如权利要求1~5任一项所述的充电电路进行充电的方法,其特征在于,包括:

所述控制器接收所述电压检测装置发送的电压信息,以及所述电流互感器发送的电流信息,所述电流信息指示所述超级电容器的充电电流,所述电压信息指示所述超级电容器两端的电压;

所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息,产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断,产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断;

其中,所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息,产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断,产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断,包括:

若所述电压信息指示所述超级电容两端的电压超过第一电压阈值,且所述电流信息指示所述超级电容的充电电流小于第一电流阈值,则所述控制器产生的所述第一路脉冲为关断触发脉冲,使得所述第一开关关断,所述控制器产生的所述第二路脉冲为导通触发脉冲,使得所述第二开关管导通;

若所述电压信息指示所述超级电容两端的电压小于第二电压阈值,且所述电流信息指示所述超级电容的充电电流大于第二电流阈值,则所述控制器产生的所述第一路脉冲为导通触发脉冲,使得所述第一开关导通,所述控制器产生的所述第二路脉冲为关断触发脉冲,使得所述第二开关管关断。

充电电路及充电方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电动汽车技术,尤其涉及一种充电电路及充电方法。

背景技术

[0002] 随着环保意识的深入人心,具有零排放、无污染、能量利用率高等特点的电动汽车越来越受到消费者的青睐。超级电容器作为一种新型储能元件,越来越多的被运用到电动汽车中。

[0003] 超级电容器充电时,电极表面处于理想极化状态,电荷将吸引周围电解质溶液中的异性离子,使其处于电极表面,形成双电荷层,构成双电层电容。目前,超级电容器在RC恒

压充电模式下进行充电,该模式下充电效率为 $\eta = \frac{E_c}{E_i} = \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$ 。

[0004] 经验证发现,RC恒压充电模式下,充电效率不会超过50%,并且与电阻阻止无关,充电效率低、电能损耗大。

发明内容

[0005] 本发明提供一种充电电路及充电方法,以提高超级电容器的充电效率,并降低电能损耗。

[0006] 第一个方面,本发明实施例提供一种充电电路,包括:直流恒压源、第一开关管、第二电阻、电感、电流互感器、电压检测装置、超级电容器、第二开关管以及控制器,其中,

[0007] 所述直流恒压源的正极与所述第一开关管的输入端连接,所述第一开关管的输出端与所述第二电阻的第一端连接,所述第二电阻的第二端与所述电感的第一端连接,所述电感的第二端与所述电流互感器的输入端连接,所述电流互感器的输出端与所述电压检测装置的输入端连接,所述电压检测装置的输出端与所述超级电容器的第一端连接,所述超级电容器的第二端与所述直流恒压源的负极连接;

[0008] 所述电流互感器用于检测所述超级电容器的充电电流,所述电压检测装置用于检测所述超级电容器两端的电压;

[0009] 所述第二电阻的第二端还与所述第二开关管的输入端连接,所述超级电容器的第二端还与所述第二开关管的输出端连接;

[0010] 所述控制器的输入端与所述电流互感器的输出端以及所述电压检测装置的输出端连接,所述控制器的输出端与所述第一开关管的控制端以及所述第二开关管的控制端连接,用于根据所述电流互感器获得的所述超级电容器的充电电路,以及所述电压检测装置获得的所述超级电容两端的电压,产生第一路脉冲与第二路脉冲,所述第一路脉冲用于控制所述第一开关管的导通或关断,所述第二路脉冲用于控制所述第二开关管的导通或关断,所述第一路脉冲与所述第二路脉冲为互补脉冲。

[0011] 在第一个方面的第一种可能的实现方式中,所述第一开关管还设置第一保护电

路,所述第一保护电路包括:第一二极管、第二二极管、第三二极管、第四二极管、第一电阻以及第一电容,所述第一二极管、所述第二二极管、所述第三二极管以及所述第四二极管并联在所述第一开关管的输入端与输出端;

[0012] 所述第一电阻与所述第一电容串联后并联在所述第一开关管的输入端与输出端。

[0013] 结合第一个方面或第一个方面的第一种可能的实现方式,在第一个方面的第二种可能的实现方式中,所述第二开关管还设置第二保护电路,所述第二保护电路包括:第五二极管、第六二极管、第七二极管、第八二极管、第三电阻以及第三电容,所述第五二极管、所述第六二极管、所述第七二极管以及所述第八二极管并联在所述第二开关管的输入端与输出端;

[0014] 所述第三电阻与所述第三电容串联后并联在所述第二开关管的输入端与输出端。

[0015] 结合第一个方面或第一个方面的第一种可能的实现方式,在第一个方面的第三种可能的实现方式中,所述第一开关管与所述第二开关管为全控型器件。

[0016] 结合第一个方面的第三种可能的实现方式,在第一个方面的第四种可能的实现方式中,所述全控型器件包括:绝缘栅双极型晶体管、门极可关断晶闸管。

[0017] 第二个方面,本发明实施例提供一种采用如上第一个方面、第一个方面的第一种至第四种中任一种方式实现的充电电路进行充电的方法,该方法包括:

[0018] 所述控制器接收所述电压检测装置发送的电压信息,以及所述电流互感器发送的电流信息,所述电流信息指示所述超级电容器的充电电流,所述电压信息指示所述超级电容器两端的电压;

[0019] 所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息,产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断,产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断。

[0020] 在第二个方面的第一种可能的实现方式中,所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息,产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断,产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断,包括:

[0021] 若所述电压信息指示所述超级电容两端的电压超过第一电压阈值,且所述电流信息指示所述超级电容的充电电流小于第一电流阈值,则所述控制器产生的所述第一路脉冲为关断触发脉冲,使得所述第一开关关断,所述控制器产生的所述第二路脉冲为导通触发脉冲,使得所述第二开关管导通。

[0022] 在第二个方面的第二种可能的实现方式中,所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息,产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断,产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断,包括:

[0023] 若所述电压信息指示所述超级电容两端的电压小于第二电压阈值,且所述电流信息指示所述超级电容的充电电流大于第二电流阈值,则所述控制器产生的所述第一路脉冲为导通触发脉冲,使得所述第一开关导通,所述控制器产生的所述第二路脉冲为关断触发脉冲,使得所述第二开关管关断。

[0024] 本发明实施例提供的充电电路及充电方法,充电电路包括:直流恒压源、第一开关管、第二电阻、电感、电流互感器、电压检测装置、超级电容器、第二开关管以及控制器,控制器根据电流互感器获得的超级电容器的充电电路,以及电压检测装置获得的超级电容两端的电压,产生第一路脉冲以控制第一开关管的导通或关断,产生第二路脉冲以控制第二开

关管的导通或关断。采用本发明实施例所述的充电电路,在RLC恒压充电模式下对超级电容器进行充电,通过采用互补脉冲触发第一开关管及第二开关管开实现对超级电容器充电的控制,该充电电路共用到两个开关管,使用器件少。同时,通过控制器输出的周期性触发脉冲的宽度来调整超级电容器的输出电压,实现对超级电容器的高效充电,充电时间短。

附图说明

- [0025] 图1为本发明一实施例提供的充电电路的结构示意图;
- [0026] 图2为本发明一实施例提供的充电电路进行充电的方法的流程图;
- [0027] 图3为本发明一实施例提供的充电电路的等效电路图;
- [0028] 图4为本发明一实施例提供的充电方法中充电电流与电压的仿真图;
- [0029] 图5为本发明另一实施例提供的充电方法中充电电流与电压的仿真图;
- [0030] 图6为本发明又一实施例提供的充电方法中充电效率的仿真图。

具体实施方式

[0031] 图1为本发明一实施例提供的充电电路的结构示意图。如图1所示,本实施例提供的充电电路包括:直流恒压源1、第一开关管2、第二电阻4、电感5(即图1中所示L)、电流互感器6、电压检测装置7、超级电容器3(即图1中所示C)、第二开关管8以及控制器9,其中,

[0032] 所述直流恒压源1的正极与所述第一开关管2的输入端连接,所述第一开关管2的输出端与所述第二电阻4的第一端连接,所述第二电阻4的第二端与所述电感5的第一端连接,所述电感5的第二端与所述电流互感器6的输入端连接,所述电流互感器6的输出端与所述电压检测装置7的输入端连接,所述电压检测装置7的输出端与所述超级电容器3的第一端连接,所述超级电容器3的第二端与所述直流恒压源1的负极连接;

[0033] 所述电流互感器6用于检测所述超级电容器3的充电电流,所述电压检测装置7用于检测所述超级电容器3两端的电压;

[0034] 所述第二电阻4的第二端还与所述第二开关管8的输入端连接,所述超级电容器3的第二端还与所述第二开关管8的输出端连接;

[0035] 所述控制器9的输入端与所述电流互感器6的输出端以及所述电压检测装置7的输出端连接,所述控制器9的输出端与所述第一开关管2管的控制端以及所述第二开关管8的控制端连接,所述控制器还用于产生第一路脉冲与第二路脉冲,所述第一路脉冲用于控制所述第一开关管2的导通或关断,所述第二路脉冲用于控制所述第二开关管8的导通或关断,所述第一路脉冲与所述第二路脉冲为互补脉冲。

[0036] 根据上述可知,上述的充电电路存在感性元件,使得充电电流不能突变,同时保持充电电流的连续。而且,充电电路还设置了续流桥,即电感L与超级电容器C之间的第二开关管以及第二保护电路部分。对超级电容器C进行充电的过程中,控制器产生两路控制脉冲,即用于控制第一开关管关断或导通的第一路脉冲,以及控制第二开关管关断或导通的第二路脉冲。该两路脉冲正负完全相反,为互补脉冲。这样,在第一开关管触发导通时刻,第二开关管触发关断,直流恒压源给超级电容器充电,而第一开关管触发关断时刻,第二开关管触发导通,充电电流通过续流桥实现续流。

[0037] 在对本发明充电电路的结构进行说明的基础上,下面,对本发明充电电路的工作

原理进行详细说明。

[0038] 具体的,控制器根据电流互感器获得的超级电容器的充电电路,以及电压检测装置获得的超级电容两端的电压,产生第一路脉冲以控制第一开关管的导通或关断,产生第二路脉冲以控制第二开关管的导通或关断,从而使得超级电容器处于RLC恒压模式充电。该过程中,通过电流互感器检测当前实际充电电流 I_c ,通过电压检测检测当前超级电容器C两端电压 U_c ,电流互感器、电压检测向控制器输入充电电流值和超级电容器C的充电电压值,在控制器内发出控制命令。刚开始进行充电时,控制器U向第一开关管发出第一路脉冲以触发第一开关管导通,并向第二开关管发出第二路脉冲以触发第二开关管关断冲;当控制器检测到超级电容器C6两端电压 U_c 为最大值,即超过直流恒压源的电压值、且当前实际充电电流 I_c 很小时,控制器MCU向第一开关管发出第一路脉冲以触发第一开关管关断,并向第二开关管发出第二路脉冲以触发第二开关管导通,充电电流通过续流桥实现续流,充电时间例如在5秒左右,充电时间短。因此,基于该充电电路,能够在RLC恒压充电模式下对超级电容进行快速充电,且形成该充电电路的元器件较少、充电效率高、充电电流可控、电能损耗小,充电时间较短。

[0039] 本发明实施例提供的充电电路,包括:直流恒压源、第一开关管、第二电阻、电感、电流互感器、电压检测装置、超级电容器、第二开关管以及控制器,控制器根据电流互感器获得的超级电容器的充电电路,以及电压检测装置获得的超级电容两端的电压,产生第一路脉冲以控制第一开关管的导通或关断,产生第二路脉冲以控制第二开关管的导通或关断。采用本发明实施例所述的充电电路,在RLC恒压充电模式下对超级电容器进行充电,通过采用互补脉冲触发第一开关管及第二开关管开实现对超级电容器充电的控制,该充电电路共用两个开关管,使用器件少。同时,通过控制器输出的周期性触发脉冲的宽度来调整超级电容器的输出电压,实现对超级电容器的高效充电,充电时间短。

[0040] 可选的,在请参照图1,上述实施例中,所述第一开关管2还设置第一保护电路,所述第一保护电路包括:第一二极管D1、第二二极管D2、第三二极管D3、第四二极管D4、第一电阻R1以及第一电容C1,所述第一二极管D1、所述第二二极管D2、所述第三二极管D3以及所述第四二极管D4并联在所述第一开关管2的输入端与输出端;所述第一电阻R1与所述第一电容C1串联后并联在所述第一开关管2的输入端与输出端。

[0041] 具体的,通过设置该第一保护电路对第一开关管进行保护,使得充电电路具有较高的可靠性。

[0042] 可选的,在请参照图1,上述实施例中,所述第二开关管8还设置第二保护电路,所述第二保护电路包括:第五二极管D5、第六二极管D6、第七二极管D7、第八二极管D8、第三电阻R3以及第三电容C3,所述第五二极管D5、所述第六二极管D6、所述第七二极管D7以及所述第八二极管D8并联在所述第二开关管8的输入端与输出端;所述第三电阻R3与所述第三电容C3串联后并联在所述第二开关管8的输入端与输出端。

[0043] 具体的,可以将第二开关管8以及第二保护电路,作为电感L与超级电容器C之间实现续流的续流桥,通过设置续流桥,使得充电电流经过续流桥实现续流,保持了充电电流的持续性。

[0044] 可选的,上述实施例中,第一开关管2与第二开关管8可以为全控型器件,如绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,IGBT)、门极可关断晶闸管(Gate-

Turn-Off Thyristor, GTO) 等。

[0045] 上述实施例中, 控制器根据电流互感器获得的超级电容器的充电电路, 以及电压检测装置获得的超级电容两端的电压, 产生第一路脉冲以控制第一开关管的导通或关断, 产生第二路脉冲以控制第二开关管的导通或关断, 从而使得超级电容器处于RLC恒压模式充电。下面, 对该充电电路的工作方法进行详细说明。具体的, 可参见图2, 图2为本发明一实施例提供的充电电路进行充电的方法的流程图, 包括:

[0046] 101、所述控制器接收所述电压检测装置发送的电压信息, 以及所述电流互感器发送的电流信息, 所述电流信息指示所述超级电容器的充电电流, 所述电压信息指示所述超级电容器两端的电压;

[0047] 102、所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息, 产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断, 产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断。

[0048] 上述充电电路进行充电的方法, 是与图1所示充电电路对应的充电方法, 具体原理及实现过程请参见图1的描述, 此处不再赘述。

[0049] 本发明实施例提供的充电方法, 控制器根据电流互感器获得的超级电容器的充电电路, 以及电压检测装置获得的超级电容两端的电压, 产生第一路脉冲以控制第一开关管的导通或关断, 产生第二路脉冲以控制第二开关管的导通或关断。采用本发明实施例所述的充电电路, 在RLC恒压充电模式下对超级电容器进行充电, 通过采用互补脉冲触发第一开关管及第二开关管开实现对超级电容器充电的控制, 该充电电路共用到两个开关管, 使用器件少。同时, 通过控制器输出的周期性触发脉冲的宽度来调整超级电容器的输出电压, 实现对超级电容器的高效充电, 充电时间短。

[0050] 可选的, 上述实施例中, 所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息, 产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断, 产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断, 包括: 若所述电压信息指示所述超级电容两端的电压超过第一电压阈值, 且所述电流信息指示所述超级电容的充电电流小于第一电流阈值, 则所述控制器产生的所述第一路脉冲为关断触发脉冲, 使得所述第一开关关断, 所述控制器产生的所述第二路脉冲为导通触发脉冲, 使得所述第二开关管导通。

[0051] 可选的, 上述实施例中, 所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息, 产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断, 产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断, 包括:

[0052] 若所述电压信息指示所述超级电容两端的电压小于第二电压阈值, 且所述电流信息指示所述超级电容的充电电流大于第二电流阈值, 则所述控制器产生的所述第一路脉冲为导通触发脉冲, 使得所述第一开关导通, 所述控制器产生的所述第二路脉冲为关断触发脉冲, 使得所述第二开关管关断。

[0053] 为使得上述实施例更新清楚, 下面, 对本发明充电电路的等效电路进行详细说明。具体的, 可参见图3, 图3为本发明一实施例提供的充电电路的等效电路图。

[0054] 根据图3可知, 本发明实施例提供的充电电路可等效为一个RLC串联电路, 充电电流为 i , 超级电容器C上的电压为 V_c 。当第一开关管导通、第二开关管关断时, 该等效电路中的开关, 即S连通, 直流恒压源给超级电容器充电; 当第一开关管关断、第二开关管导通时,

该等效电路中的开关S断开,充电电流通过续流桥实现续流。下面,从第一开关管触发导通时刻,第二开关管触发关断,直流恒压源给超级电容器充电时,充电电流的大小;以及第一开关管触发关断时刻,第二开关管触发导通,充电电流通过续流桥实现续流时,超级电容器两端的电压的大小两个角度对本发明进行详细说明。

[0055] 首先,第一开关管触发导通时刻,第二开关管触发关断,直流恒压源给超级电容器充电时,充电电流的大小。

[0056] 具体的,设在 $t=0$ 时刻,开关S连通,直流恒压源的电压为 E ,即加在电路上的直流电压为 E 。那么, $t>0$ 时,电路方程为:

$$[0057] \quad L \frac{di}{dt} + Ri + V_c = E \quad (1)$$

$$[0058] \quad i = \frac{dq}{dt}, \frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}, V_c = \frac{q}{C} \quad (2)$$

其中, q 为 t 时长内的电量。

[0059] 根据公式(1)与公式(2)可得:

$$[0060] \quad L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E \quad (3)$$

[0061] 令 $\frac{d}{dt} = D$,根据公式(3)可得:

$$[0062] \quad (LD^2 + RD + \frac{1}{C})q = E \quad (4)$$

[0063] 根据公式(4)可知, q 的特殊解为:

$$[0064] \quad q = CE \quad (5)$$

[0065] 根据公式(3),得到公式(3)的齐次方程:

$$[0066] \quad (LD^2 + RD + \frac{1}{C})q = 0 \quad (6)$$

[0067] 根据公式(6)得出齐次方程的特征方程,以及该特征方程的根为:

$$[0068] \quad Lr^2 + Rr + \frac{1}{C} = 0;$$

$$[0069] \quad \lambda = \begin{cases} r_1 = -\alpha_0 + \beta_0 \\ r_2 = -\alpha_0 - \beta_0 \end{cases};$$

$$[0070] \quad \alpha_0 = \frac{R}{2L}; \quad \beta_0 = \frac{\sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L} \quad (7)$$

[0071] 第一种情况:

[0072] 由公式(7)可知:若满足 $R^2 - 4L/C > 0$; $r_1, r_2 = -\alpha_0 \pm \beta_0$,非振动时,公式(6)的通解为:

$$[0073] \quad q_2 = K_1 e^{r_1 t} + K_2 e^{r_2 t} \quad (8)$$

[0074] 所以:

$$[0075] \quad q = CE + K_1 e^{r_1 t} + K_2 e^{r_2 t} \quad (9)$$

$$[0076] \quad i = \frac{dq}{dt} = K_1 r_1 e^{r_1 t} + K_2 r_2 e^{r_2 t} \quad (10)$$

[0077] 利用已给出的初始条件：

$$[0078] \quad \begin{aligned} q|_{t=0} &= 0, \\ i|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

[0079] 可知：

$$q|_{t=0} = CE + K_1 + K_2 = 0,$$

$$[0080] \quad i|_{t=0} = \frac{dq}{dt} = K_1 r_1 + K_2 r_2 = 0 \quad (12)$$

[0081] 根据公式 (12) 可知：

$$[0082] \quad K_1 = \frac{r_2 CE}{r_1 - r_2}, \quad K_2 = -\frac{r_1 CE}{r_1 - r_2} \quad (13)$$

[0083] 由公式 (10) ~ (13) 可知：

$$[0084] \quad \begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = K_1 r_1 e^{r_1 t} + K_2 r_2 e^{r_2 t} = \frac{r_2 CE}{r_1 - r_2} r_1 e^{r_1 t} - \frac{r_1 CE}{r_1 - r_2} r_2 e^{r_2 t} \\ &= \frac{r_1 r_2 CE}{r_1 - r_2} (e^{r_1 t} - e^{r_2 t}) \end{aligned} \quad (14)$$

[0085] 由二阶方程的根与系数的关系可知：

$$[0086] \quad r_1 r_2 = 1/LC, \quad r_1 - r_2 = 2\beta_0 \quad (15)$$

[0087] 所以：

$$[0088] \quad \frac{r_1 r_2 CE}{r_1 - r_2} = \frac{CE/LC}{2\beta_0} = \frac{E}{2\beta_0 L} \quad (16)$$

[0089] 将公式 (7)、(16) 带入公式 (14) 得到：

$$[0090] \quad \begin{aligned} i &= \frac{r_1 r_2 CE}{r_1 - r_2} (e^{r_1 t} - e^{r_2 t}) \\ &= \frac{E}{2\beta_0 L} [e^{-(\alpha_0 - \beta_0) t} - e^{-(\alpha_0 + \beta_0) t}] \\ &= \frac{E}{\beta_0 L} e^{-\alpha_0 t} \frac{e^{\beta_0 t} - e^{-\beta_0 t}}{2} \\ &= I e^{-\alpha_0 t} \sinh \beta_0 t \end{aligned} \quad (17),$$

$$\text{其中, } I = \frac{E}{\beta_0 L}$$

[0091] 第二种情况:

[0092] 由公式 (7) 可知: 若满足 $R^2 - 4L/C < 0$; $r_1, r_2 = -\alpha_0 \pm j\omega_0$ ($j\omega_0 = \beta_0 = j\frac{\sqrt{4L/C - R^2}}{2L}$) 的递减振动时, 根据公式 (17) 可知:

$$\begin{aligned} i &= \frac{E}{\beta_0 L} e^{-\alpha_0 t} \frac{e^{\beta_0 t} - e^{-\beta_0 t}}{2} \\ &= I e^{-\alpha_0 t} \sinh \beta_0 t \\ &= \frac{E}{j\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} \sinh(j\omega_0 t) \\ &= \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} \frac{\sinh(j\omega_0 t)}{j} \\ [0093] \quad &= \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} \frac{(e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t})j}{2j} \\ &= \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} \frac{(\sin \omega_0 t)j}{j} \\ &= I e^{-\alpha_0 t} (\sin \omega_0 t) \end{aligned} \quad (18),$$

$$\text{其中, } I = \frac{E}{\omega_0 L}.$$

[0094] 当 $R=0$ 时, $\alpha_0 = \frac{R}{2L} = 0$, $r_1, r_2 = \pm j\omega_0$, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, 由公式 (18) 可知:

$$\begin{aligned} i &= \frac{E}{\omega_0 L} (\sin \omega_0 t) \\ [0095] \quad &= \frac{E}{\sqrt{L/C}} \left(\sin \frac{t}{\sqrt{LC}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

[0096] 第三种情况:

[0097] 由公式 (7) 可知: 若满足 $R^2 - 4L/C = 0$; $r_1, r_2 = -\alpha_0$, 在此临界情况下, 在公式 (14) 中令 $r_1 = r_2$, 则解为称作 $0/0$ 的不定型解, 因此, 可求公式 (14) 在 $r_1 = r_2 \rightarrow 0$ 时的极限, 结合公式 (15) 可得:

$$\begin{aligned}
i &= \lim_{(r_1-r_2) \rightarrow 0} \frac{r_1 r_2 C E}{r_1 - r_2} (e^{r_1 t} - e^{r_2 t}) \\
&= \frac{CE}{LC} \lim_{(r_1 \rightarrow r_2)} \frac{e^{r_2 t}}{r_1 - r_2} [e^{(r_1-r_2)t} - 1] \\
[0098] \quad &= \frac{E}{L} e^{r_2 t} \Big|_{r_2 = -\alpha_0} \times \lim_{(r_1 \rightarrow r_2)} \frac{1}{r_1 - r_2} \left[1 + \frac{(r_1 - r_2)t}{1!} + \frac{[(r_1 - r_2)t]^2}{2!} + \dots - 1 \right] \\
&= \frac{E}{L} e^{-\alpha_0 t} \lim_{(r_1 \rightarrow r_2)} \left[\frac{t}{1!} + \frac{(r_1 - r_2)t^2}{2!} + \dots \right] \\
&= \frac{E}{L} e^{-\alpha_0 t} \times t = I \alpha_0 t e^{-\alpha_0 t}
\end{aligned} \tag{20}$$

[0099] 其次,第一开关管触发关断时刻,第二开关管触发导通,充电电流通过续流桥实现续流时,超级电容器两端的电压的大小。可以通过如下两种方法确定出电压的大小。

[0100] 第一种方法:

[0101] 具体的,设在 $t=0$ 时刻,开关S连通,直流恒压源的电压为E,即加在电路上的直流电压为E。那么, $t>0$ 时,电路方程为:

$$[0102] \quad L \frac{di}{dt} + Ri + V_c = E \tag{1}$$

$$[0103] \quad i = C \frac{dV_c}{dt}, \frac{di}{dt} = C \frac{d^2 V_c}{dt^2} \tag{21}$$

[0104] 根据公式(1)与(21)可知:

$$[0105] \quad LC \frac{d^2 V_c}{dt^2} + RC \frac{dV_c}{dt} + V_c = E \tag{22}$$

[0106] 令 $D = \frac{d}{dt}$,则根据公式(22)可得:

$$[0107] \quad (LCD^2 + RCD + 1) V_c = E \tag{23}$$

[0108] 根据公式(23)可知, V_c 的特殊解为:

$$[0109] \quad V_c = E \tag{24}$$

[0110] 根据公式(23),得到公式(23)的其次方程:

$$[0111] \quad (LCD^2 + RCD + 1) V_c = 0 \tag{25}$$

[0112] 根据公式(25)得出齐次方程的特征方程,以及该特征方程的根为:

$$[0113] \quad LCr^2 + CRr + 1 = 0$$

$$[0114] \quad \lambda = \begin{cases} r_1' = -\alpha_0 + \beta_0' \\ r_2' = -\alpha_0 - \beta_0' \end{cases}$$

$$[0115] \quad \alpha_0 = \frac{RC}{2LC} = \frac{R}{2L}, \quad \beta_0' = \frac{\sqrt{R^2 C^2 - 4LC}}{2LC} = \beta_0 \tag{26}$$

[0116] 第一种情况：

[0117] 由公式 (26) 可知：若满足 $R^2C^2 - 4LC > 0$ ； $r_1, r_2 = -\alpha_0 \pm \beta_0$ ，非振动时，公式 (25) 的通解为：

$$[0118] \quad V_c = K'_1 e^{r'_1 t} + K'_2 e^{r'_2 t} \quad (27)$$

[0119] 所以：

$$[0120] \quad V_c = E + K'_1 e^{r'_1 t} + K'_2 e^{r'_2 t} \quad (28)$$

$$[0121] \quad i = C \frac{dV_c}{dt} = C(K'_1 r'_1 e^{r'_1 t} + K'_2 r'_2 e^{r'_2 t}) \quad (29)$$

[0122] 利用已给出的初始条件：

$$[0123] \quad \begin{aligned} V_c \big|_{t=0} &= 0, \\ i \big|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

[0124] 可知：

$$[0125] \quad \begin{aligned} V_c \big|_{t=0} &= E + K'_1 + K'_2 = 0 \\ i \big|_{t=0} &= C \frac{dV_c}{dt} = C(K'_1 r'_1 + K'_2 r'_2) = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

[0126] 根据公式 (31) 可知：

$$[0127] \quad K'_1 = \frac{r'_2 E}{r'_1 - r'_2}, \quad K'_2 = -\frac{r'_1 E}{r'_1 - r'_2} \quad (32)$$

[0128] 由公式 (28) ~ (32) 可知：

$$[0129] \quad \begin{aligned} V_c &= E + K'_1 e^{r'_1 t} + K'_2 e^{r'_2 t} = E + \frac{r'_2 E}{r'_1 - r'_2} e^{r'_1 t} - \frac{r'_1 E}{r'_1 - r'_2} e^{r'_2 t} \\ &= E + \frac{E}{r'_1 - r'_2} (r'_2 e^{r'_1 t} - r'_1 e^{r'_2 t}) \end{aligned} \quad (33)$$

[0130] 由二阶方程的根与系数的关系可知：

$$[0131] \quad r'_1 r'_2 = 1/LC, \quad r'_1 - r'_2 = 2\beta'_0 \quad (34)$$

[0132] 所以：

$$[0133] \quad \frac{E}{r'_1 - r'_2} = \frac{E}{2\beta'_0} \quad (35)$$

[0134] 将公式 (26)、(35) 带入公式 (33) 得到：

$$\begin{aligned}
V_c &= E + \frac{E}{r'_1 - r'_2} (r'_2 e^{r'_1 t} - r'_1 e^{r'_2 t}) \\
&= E + \frac{E}{2\beta'_0} \left[-(\alpha_0 + \beta'_0) e^{-(\alpha_0 - \beta'_0)t} + (\alpha_0 - \beta'_0) e^{-(\alpha_0 + \beta'_0)t} \right] \\
[0135] \quad &= E + \frac{E}{\beta'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[-\alpha_0 \left(\frac{e^{\beta'_0 t} - e^{-\beta'_0 t}}{2} \right) - \beta'_0 \left(\frac{e^{-\beta'_0 t} + e^{\beta'_0 t}}{2} \right) \right] \\
&= E + \frac{E}{\beta'_0} e^{-\alpha_0 t} (-\alpha_0 \sinh \beta'_0 t - \beta'_0 \cosh \beta'_0 t)
\end{aligned} \tag{36}$$

[0136] 第二种情况：

[0137] 由公式 (26) 可知：若满足 $R^2 C^2 - 4LC < 0$ ； $j\omega'_0 = \beta'_0 = j \frac{\sqrt{4LC - R^2 C^2}}{2LC} = \beta_0 = j\omega_0$ 的递减振动时，根据公式 (36) 可知：

$$\begin{aligned}
V_c &= E + \frac{E}{\beta'_0} e^{-\alpha_0 t} (-\alpha_0 \sinh \beta'_0 t - \beta'_0 \cosh \beta'_0 t) \\
&= E + \frac{E}{j\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} [-\alpha_0 \sinh(j\omega'_0 t) - \beta'_0 \cosh(j\omega'_0 t)] \\
&= E + \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[-\alpha_0 \frac{\sinh(j\omega'_0 t)}{j} - \beta'_0 \frac{\cosh(j\omega'_0 t)}{j} \right] \\
&= E + \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[-\alpha_0 \frac{(e^{j\omega'_0 t} - e^{-j\omega'_0 t})j}{2j} - \beta'_0 \frac{(e^{j\omega'_0 t} + e^{-j\omega'_0 t})}{2} \right] \\
[0138] \quad &= E + \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[-\alpha_0 \sin(\omega'_0 t) - \beta'_0 \frac{\cos(\omega'_0 t)}{j} \right] \\
&= E - \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[\alpha_0 \sin(\omega'_0 t) + j\omega'_0 \frac{\cos(\omega'_0 t)}{j} \right] \\
&= E - \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[\sqrt{\alpha_0^2 + \left(\frac{\beta'_0}{j} \right)^2} \sin(\omega'_0 t + \phi) \right] \\
&= E - \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[\sqrt{\alpha_0^2 + (\omega'_0)^2} \sin(\omega'_0 t + \phi) \right]
\end{aligned} \tag{37}$$

[0139] 其中, $\phi = \arctan \frac{\beta'_0}{j\alpha_0} = \arctan \frac{\omega'_0}{\alpha_0}$ (38)

[0140] 当 $R=0$ 时, $\alpha_0 = \frac{R}{2L} = 0$, $r_1, r_2 = \pm j\omega'_0, \omega'_0 = \sqrt{C/L}$, 根据公式 (37) 可知:

$$\begin{aligned}
 V_c &= E - \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[\sqrt{\alpha_0^2 + (\omega'_0)^2} \sin(\omega'_0 t + \phi) \right] \\
 &= E - \frac{E}{\sqrt{C/L}} \left[\sqrt{(\sqrt{C/L})^2} \sin(\sqrt{C/L} t + \phi) \right] \\
 &= E - \frac{E}{\sqrt{C/L}} \left[\sqrt{C/L} \sin(\sqrt{C/L} t + \phi) \right] \\
 &= E - E \sin(\sqrt{C/L} t + \phi)
 \end{aligned}$$

[0141] (39)

[0142] 其中, $\phi = \arctan \frac{\omega'_0}{\alpha_0} = \arctan \frac{\sqrt{C/L}}{\alpha_0} = \frac{\pi}{2}$ (40)

第二种方法:

[0143] 根据公式 (18) 可知:

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} \frac{(\sin \omega_0 t) j}{j} \\
 &= \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} (\sin \omega_0 t) \\
 &= C \frac{dV_c}{dt} \\
 V_c &= \frac{1}{C} \int i dt + A_1 \\
 &= \frac{1}{C} \int \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt + A_1 \\
 &= \frac{E}{\omega_0 LC} \int e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt + A_1
 \end{aligned}$$

[0144] (41)

[0146] 设 $I = \int e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt$ (42)

[0147] 则根据公式 (42) 可知:

$$\begin{aligned}
I &= \int e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \int \sin(\omega_0 t) d e^{-\alpha_0 t} \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \left[\sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \int e^{-\alpha_0 t} d \sin(\omega_0 t) \right] \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \left[\sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \omega_0 \int e^{-\alpha_0 t} \cos(\omega_0 t) dt \right] \\
[0148] \quad &= -\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} + \frac{\omega_0}{\alpha_0} \int e^{-\alpha_0 t} \cos(\omega_0 t) dt \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \int \cos(\omega_0 t) d e^{-\alpha_0 t} \quad (43) \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \left[\cos(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} + \omega_0 \int e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt \right] \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \cos(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0^2}{\alpha_0^2} \int e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt \\
&= -\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \cos(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0^2}{\alpha_0^2} I
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\therefore \left(1 + \frac{\omega_0^2}{\alpha_0^2} \right) I &= -\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \cos(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} + A_2 \\
[0149] \quad \therefore I &= \left(\frac{\alpha_0^2}{\alpha_0^2 + \omega_0^2} \right) \left(-\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} - \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \cos(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} \right) + A_3 \\
&= \left(-\frac{\alpha_0^2}{\alpha_0^2 + \omega_0^2} \right) \left(\frac{1}{\alpha_0} \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} + \frac{\omega_0}{\alpha_0^2} \cos(\omega_0 t) e^{-\alpha_0 t} \right) + A_3 \quad (44) \\
&= \left(-\frac{1}{\alpha_0^2 + \omega_0^2} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) \left(\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t) \right) + A_3
\end{aligned}$$

[0150] 将公式(44) 带入公式(41) 可得：

$$[0151] \quad V_c = \left(-\frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2) \omega_0 LC} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) \left(\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t) \right) + A$$

[0152] 利用初始化条件： $V_c|_{t=0}=0$ (45) 可得：

$$[0153] \quad A = \frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)LC} \quad (46)。$$

[0154] 所以：

$$[0155] \quad \begin{aligned} V_c &= \left(-\frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)\omega_0 LC} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) + A \\ &= \left(-\frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)\omega_0 LC} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) + \frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)LC} \quad (47) \\ &= \frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)LC} - \left(\frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)\omega_0 LC} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \end{aligned}$$

$$[0156] \quad \text{其中, } \alpha_0 = \frac{RC}{2LC} = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{4L/C - R^2}}{2L}$$

$$[0157] \quad \begin{aligned} \therefore (\alpha_0^2 + \omega_0^2)LC &= \left(\left(\frac{R}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4L/C - R^2}}{2L} \right)^2 \right) LC \\ &= \frac{4L/C}{4L^2} \bullet LC = 1 \quad (48) \end{aligned}$$

[0158] 将公式 (48) 带入公式 (47) 可得：

$$[0159] \quad \begin{aligned} V_c &= \frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)LC} - \left(\frac{E}{(\alpha_0^2 + \omega_0^2)\omega_0 LC} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \\ &= E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) \left(e^{-\alpha_0 t} \right) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \quad (49) \end{aligned}$$

[0160] 对比公式 (37) 与公式 (49) 可知：该两个表达式一样，其中， $j\omega'_0 = \beta'_0 = j\frac{\sqrt{4LC - R^2C^2}}{2LC} = \beta_0 = j\omega_0$ ，即 $\omega'_0 = \omega_0$ 。

[0161] 以上是一个整体上的说明与推导，下面，将直流恒压源提供的电压、第二电阻的阻值、超级电容器的电容、电感具有具体的取值为例对本发明充电方法进行详细说明。

[0162] 实施例一：E=10V, R=2mΩ, L=2mH, C=500F, 将上述具体值代入 $R^2 - 4L/C = -4 \times 10^{-6} < 0$ ，根据公式 (18) 可得公式 (50)，根据公式 (49) 可得公式 (51)：

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha_0 t} (\sin \omega_0 t) \\
 [0163] \quad &= \frac{10}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times 2 \times 10^{-3}} e^{\frac{1}{2}t} \left(\sin \frac{\sqrt{3}}{2} t\right) \quad (50)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1 \times 10^4}{\sqrt{3}} e^{\frac{1}{2}t} \left(\sin \frac{\sqrt{3}}{2} t\right) \\
 V_c &= E - \left(\frac{E}{\omega_0}\right) \left(e^{-\alpha_0 t} \left(\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)\right)\right) \\
 [0164] \quad &= 10 - \left(\frac{10}{\frac{\sqrt{3}}{2}}\right) \left(e^{\frac{1}{2}t}\right) \left(\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2} t\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} t\right)\right) \quad (51) \\
 &= 10 - \left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right) \left(e^{\frac{1}{2}t}\right) \left(\sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2} t + \frac{\pi}{3}\right)\right)
 \end{aligned}$$

[0165] 根据公式 (50) 与公式 (51), 对充电过程中电压与电压进行仿真, 得到图4, 图4为本发明一实施例提供的充电方法中充电电流与电压的仿真图。其中, 实线曲线 (Ic) 为充电电流曲线, 虚线曲线 (Uc) 为充电电压曲线。需要说明的是, 为了能在同一个坐标轴显示, 其中 Ic 纵坐标缩小100倍。

[0166] 理想情况下, 即当 $R=0$ 时, $\alpha_0 = \frac{R}{2L} = 0$, $r_1, r_2 = \pm j\omega_0, \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, 根据公式 (18) 可得:

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{E}{\omega_0 L} (\sin \omega_0 t) \\
 [0167] \quad &= \frac{E}{\sqrt{L/C}} \left(\sin \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

[0168] 当 $R=0$ 时, $\alpha_0 = \frac{R}{2L} = 0$, $r_1, r_2 = \pm j\omega'_0, \omega'_0 = \sqrt{1/LC}$, 对公式 (37) 变形可得:

$$\begin{aligned}
V_c &= E - \frac{E}{\omega'_0} e^{-\alpha_0 t} \left[\sqrt{\alpha_0^2 + (\omega'_0)^2} \sin(\omega'_0 t + \phi) \right] \\
&= E - \frac{E}{\sqrt{1/LC}} \left[\sqrt{(\sqrt{1/LC})^2} \sin(\sqrt{1/LC} t + \phi) \right] \\
&= E - \frac{E}{\sqrt{1/LC}} \left[\sqrt{1/LC} \sin(\sqrt{1/LC} t + \phi) \right] \\
&= E - E \sin(\sqrt{1/LC} t + \phi)
\end{aligned}
\tag{39}$$

$$\text{其中, } \phi = \arctan \frac{\omega'_0}{\alpha_0} = \arctan \frac{\sqrt{1/LC}}{\alpha_0} = \frac{\pi}{2}
\tag{40}$$

[0171] 实施例二: $E=10V, L=2mH, C=500F$ 。

[0172] 将上述具体值代入得到 $\omega_0 = \omega'_0 = 1/\sqrt{LC} = 1$, 根据公式 (19) 可得公式 (52), 根据公式 (49) 可得公式 (53):

$$\begin{aligned}
i &= \frac{E}{\omega_0 L} (\sin \omega_0 t) \\
&= \frac{10}{2 \times 10^{-3}} \sin t \\
&= 2 \times 10^3 \sin t \\
V_c &= E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \\
&= 10 - \left(\frac{10}{1} \right) \cos t \\
&= 10 - 10 \cos t
\end{aligned}
\tag{52}$$

[0175] 根据公式 (52) 与公式 (53), 对充电过程中电压与电压进行仿真, 得到图5, 图5为本发明另一实施例提供的充电方法中充电电流与电压的仿真图。其中, 实线曲线 (I_c) 为充电电流曲线, 虚线曲线 (U_c) 为充电电压曲线。需要说明的是, 为了能在同一个坐标轴显示, 其中 I_c 纵坐标缩小100倍。

[0176] 在用具体的数值对本发明充电方法中充电电流与充电电压进行详细说明后, 下面对本发明充电方法的充电效率进行详细说明。

[0177] 具体的, 充电效率 η 为:

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{E_c}{E_i} = \frac{\int_0^t V_c i_c dt}{\int_0^t E i_c dt} = \frac{\int_0^t V_c C \frac{dV_c}{dt} dt}{\int_0^t E i_c dt} \\
 [0178] \quad &= \frac{\int_0^t C V_c dV_c}{\int_0^t E i_c dt} = \frac{\frac{1}{2} C V_c^2 \Big|_0^t}{E \int_0^t i_c dt} \\
 &= \frac{\frac{1}{2} C V_c^2 \Big|_0^t - 0}{E \int_0^t i_c dt} = \frac{\frac{1}{2} C V_c^2 \Big|_0^t}{E \int_0^t i_c dt}
 \end{aligned} \tag{54}$$

[0179] 将公式 (18) 与公式 (49) 代入公式 (54) 可得：

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\frac{1}{2} C \left[E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right]^2}{E \int_0^t \frac{E}{\omega_0 L} (e^{-\alpha_0 t}) \sin(\omega_0 t) dt} \\
 [0180] \quad &= \frac{\frac{1}{2} C \left[E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right]^2}{\frac{E^2}{\omega_0 L} \int_0^t e^{-\alpha_0 t} \sin(\omega_0 t) dt}
 \end{aligned} \tag{55}$$

[0181] 将公式 (42) 与公式 (44) 代入公式 (55) 可得：

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\frac{1}{2} C \left[E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right]^2}{E \int_0^t \frac{E}{\omega_0 L} (e^{-\alpha_0 t}) \sin(\omega_0 t) dt} \\
 [0182] \quad &= \frac{\frac{1}{2} C \left[E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right]^2}{\frac{E^2}{\omega_0 L} \left[\left(-\frac{1}{\alpha_0^2 + \omega_0^2} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right] \Big|_0^t}
 \end{aligned} \tag{56}$$

[0183] 以上是一个整体上的说明与推导,下面,将直流恒压源提供的电压、第二电阻的阻值、超级电容器的电容、电感具有具体的取值为例对本发明充电效率进行详细说明。

[0184] 具体的, $E=10V$, $R=2m\Omega$, $L=2mH$, $C=500F$, 将上述具体值代入 $R^2-4L/C=-4 \times 10$

$-6 < 0$, $\omega_0 = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $\alpha_0 = \frac{1}{2}$ 代入公式 (56) 可得：

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\frac{1}{2} C \left[E - \left(\frac{E}{\omega_0} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right]^2}{\frac{E^2}{\omega_0 L} \left[\left(-\frac{1}{\alpha_0^2 + \omega_0^2} \right) (e^{-\alpha_0 t}) (\alpha_0 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 \cos(\omega_0 t)) \right] \Big|_0^t} \\
 [0185] \quad &= \frac{\frac{1}{2} \times 500 \left[10 - \left(\frac{10}{\frac{\sqrt{3}}{2}} \right) \left(e^{-\frac{1}{2}t} \right) \left(\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) \right) \right]^2}{\frac{10^2}{\frac{\sqrt{3}}{2} \times 2 \times 10^{-3}} \left[\left(-\frac{1}{\frac{1}{2}^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}^2} \right) \left(e^{-\frac{1}{2}t} \right) \left(\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) \right) \right] \Big|_0^t} \quad (57)
 \end{aligned}$$

[0186] 根据公式(57),对充电过程中充电效率进行仿真,得到图6,图6为本发明又一实施例提供的充电方法中充电效率的仿真图。根据图6可知:本发明提供的充电方法,在RLC恒压模式充电,充电效率理论值接近1,该仿真结果表明该方法能有效提高系统的充电效率。

[0187] 本发明实施例提供的充电电路及充电方法,通过控制器输出的周期性触发脉冲的宽度,即占空比,来调整超级电容器的输出电压。从而实现对超级电容器的高效充电。请参照图4与图6,在控制算法上,使用电压分级天宫充电法,在保证充电效率高效的情况下,不让充电电流过大,当充电电流超过设定值时,进行续流回馈,由于超级电容器电压不会突变,待电流值较小时,继续以该方法充电,最终使得充电电压达到满电状态,从而实现对超级电容器高效、快速充电。

[0188] 本领域普通技术人员可以理解:实现上述各方法实施例的全部或部分步骤可以通过程序指令相关的硬件来完成。前述的程序可以存储于一计算机可读取存储介质中。该程序在执行时,执行包括上述各方法实施例的步骤;而前述的存储介质包括:ROM、RAM、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0189] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

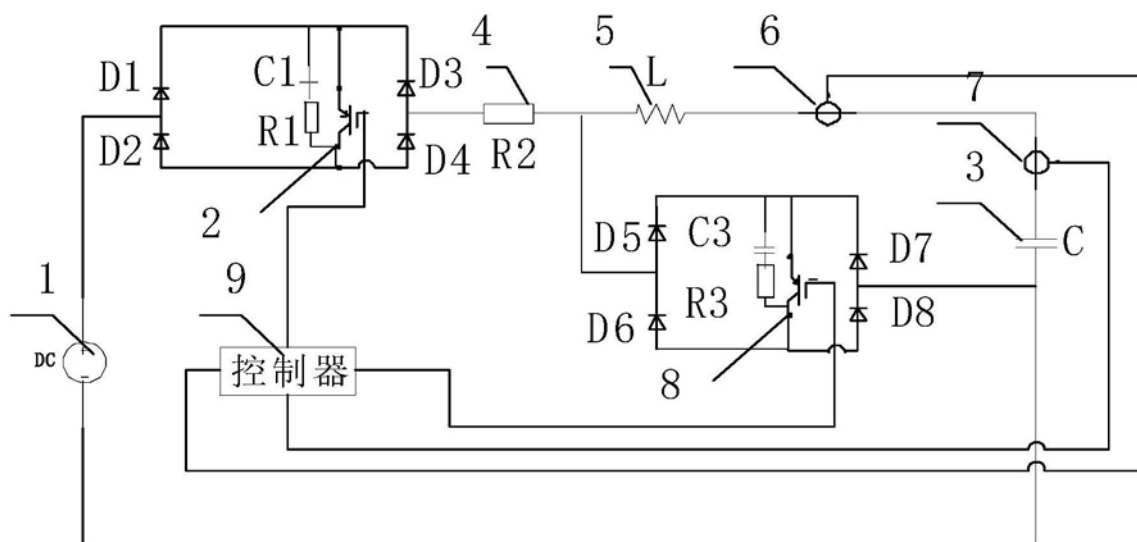


图1

所述控制器接收所述电压检测装置发送的电压信息，以及所述电流互感器发送的电流信息，所述电流信息指示所述超级电容器的充电电流，所述电压信息指示所述超级电容器两端的电压

101

所述控制器根据所述电压信息与所述电流信息，产生所述第一路脉冲以控制所述第一开关管的导通或关断，产生所述第二路脉冲以控制所述第二开关管的导通或关断

102

图2

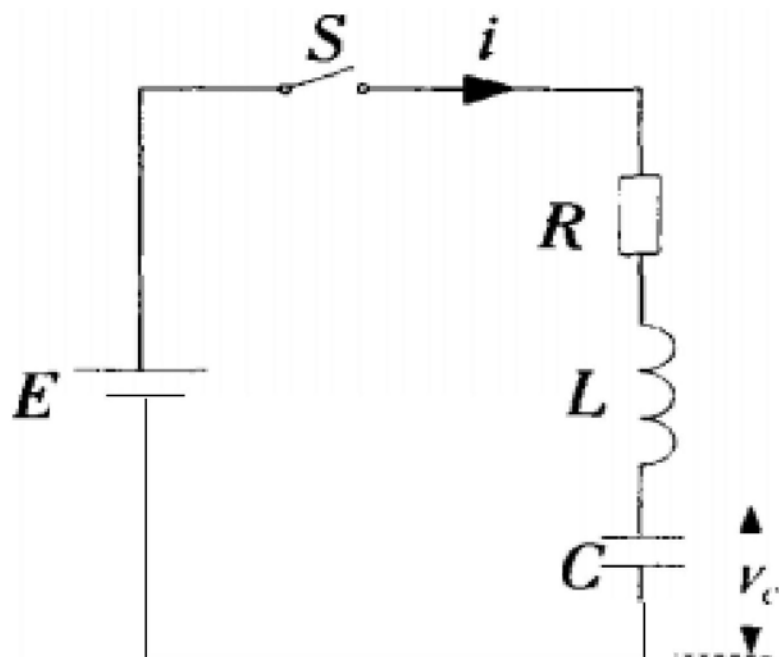


图3

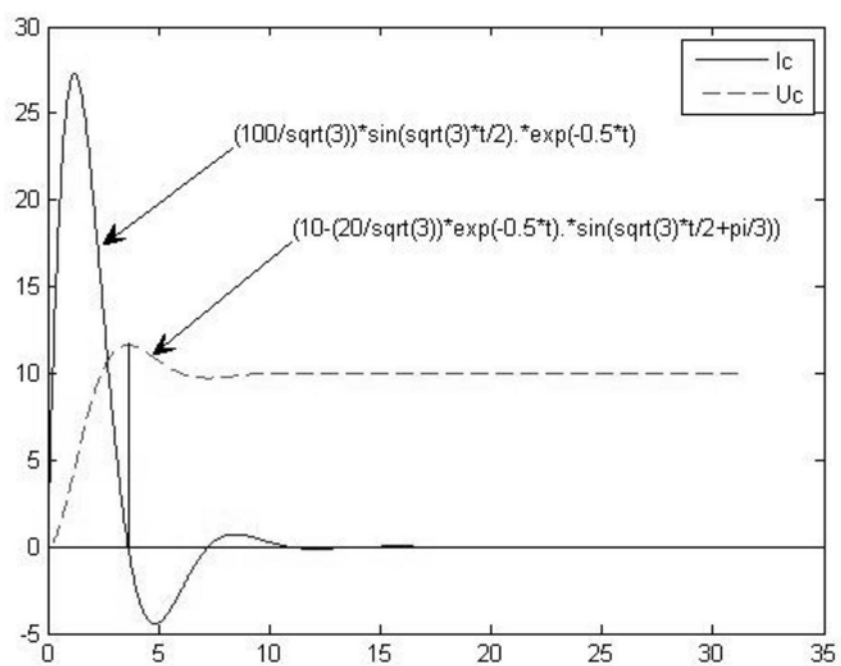


图4

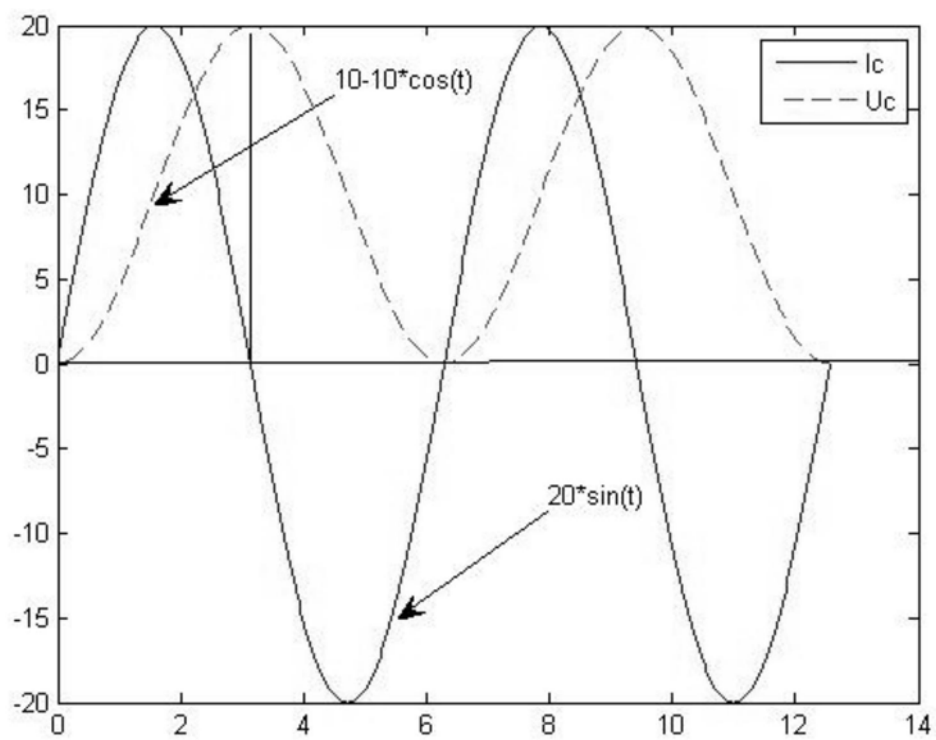


图5

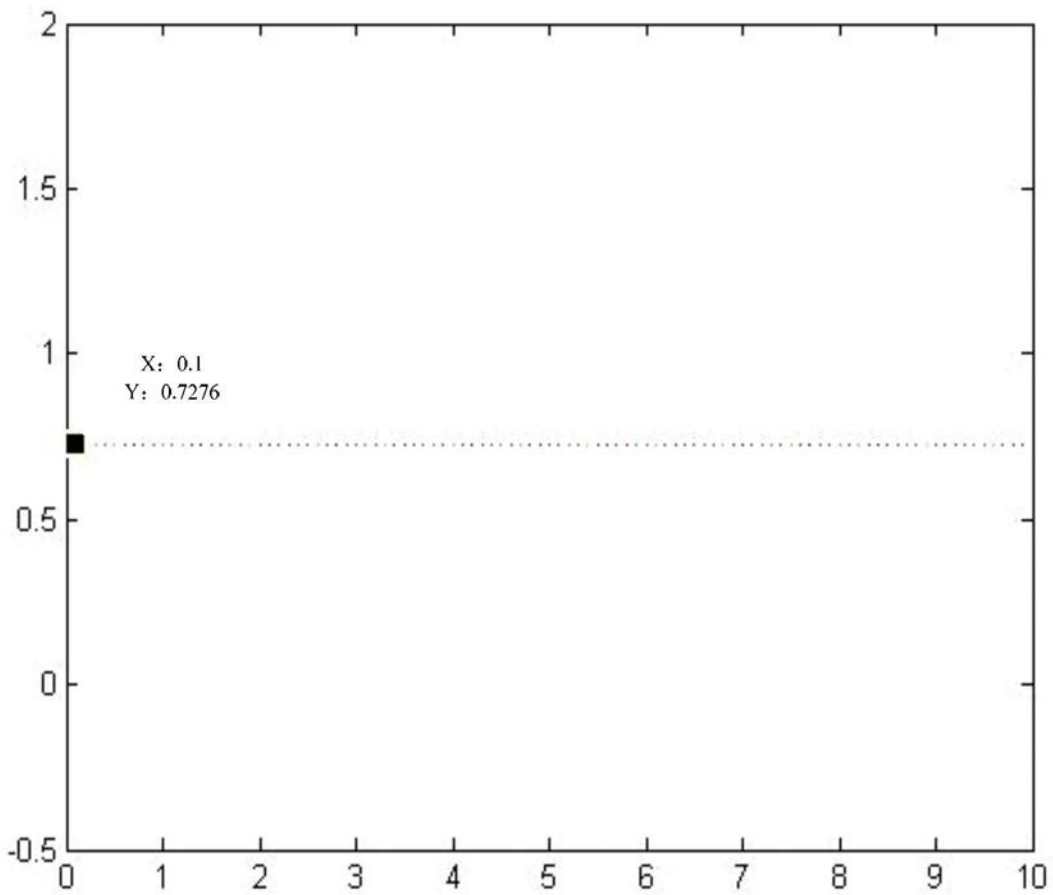


图6