(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2015 年 10 月 1 日 (01.10.2015)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2015/143891 A1

(51) 国际专利分类号:
H02J 7/10 (2006.01) *H01M 10/44* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2014/093002

(22) 国际申请日: 2014 年 12 月 4 日 (04.12.2014)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201410110951.4 2014 年 3 月 24 日 (24.03.2014) CN

(71) 申请人: **国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA)** [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。 **中国电力科学研究院 (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE)** [CN/CN]; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 **国网辽宁省电力有限公司 (STATE GRID LIAONING ELECTRIC POWER SUPPLY CO.,LTD.)** [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平区宁波路 18 号, Liaoning 110006 (CN)。

(72) 发明人: **吕志鹏 (LV, Zhipeng)**; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 **盛万兴 (SHENG, Wanxing)**; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 **刘海涛 (LIU, Haitao)**; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 **钟庆昌 (ZHONG, Qingchang)**; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 **李蕊 (LI, Rui)**; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 **梁惠施 (LIANG, Huishi)**; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。

(74) 代理人: **北京安博达知识产权代理有限公司 (AMBOYNA INTELLECTUAL PROPERTY AGENT CO.,LTD.)**; 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华杰大厦 B215 号, Beijing 100098 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

[见续页]

(54) **Title**: VIRTUAL SYNCHRONIZATION MOTOR CONTROL METHOD FOR ENERGY STORAGE AND CHARGING AND DISCHARGING OF ELECTRIC VEHICLE

(54) **发明名称** : 一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法

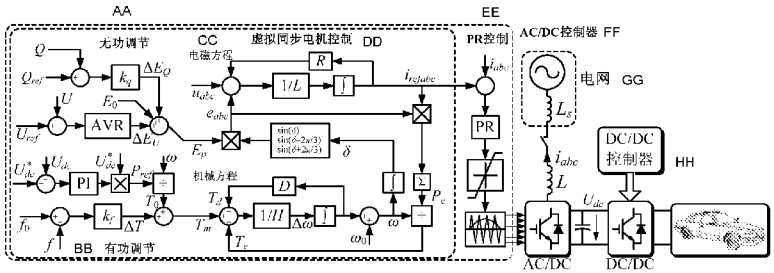


图 2 / FIG.2

AA	REACTIVE ADJUSTMENT	EE	PR CONTROL
BB	ACTIVE ADJUSTMENT	FF	AC/DC CONTROLLER
CC	ELECTROMAGNETIC EQUATION	GG	GRID
DD	VIRTUAL SYNCHRONIZATION MOTOR CONTROL	HH	DC/DC CONTROLLER

(57) **Abstract**: A virtual synchronization motor control method for the energy storage and charging and discharging of an electric vehicle. A charging circuit is a high-frequency isolated PWM rectification circuit. The PWM rectification circuit comprises an AC interface and a DC interface which are connected in sequence, the AC interface is an H bridge AC/DC rectification circuit and is used for rectifying a grid voltage into a DC voltage of 600V; the DC interface is an isolated DC/DC convertor and is used for converting the DC voltage of 600V into a DC voltage of 48V to supply a load to the electric vehicle. The method comprises: (1) controlling an AC interface using a virtual synchronization motor control strategy; and(2) conducting control of double rings, i.e. an outer voltage ring and an inner current ring, on a DC interface. The control method can reduce the influence of an energy storage charging and discharging interface on the grid, thereby improving the adaptability of the grid to large-scale energy storage access. The DC interface is an isolated DC/DC convertor, so that the demand of an energy storage battery for charging at a quick constant power can be satisfied.

(57) **摘要**:

[见续页]

WO 2015/143891 A1

(84) **指定国** (除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法，其中的充电电路为高频隔离的 PWM 整流电路，PWM 整流电路包括依次连接的交流接口和直流接口，交流接口采用 H 桥 AC/DC 整流电路，用于将电网电压整流为 600V 的直流电压；直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，用于将 600V 的直流电压转换为 48V 的直流电压，供给电动汽车负荷；该方法包括：①对交流接口采用虚拟同步电机控制策略进行控制；②对直流接口采用电压外环和电流内环的双环控制。该控制方法可降低储能充放电接口对电网的影响，提升电网对大规模储能接入的适应性。直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，可以满足储能电池快速恒功率充电的需求。

一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法

技术领域

本发明涉及一种电动汽车储能的控制方法，具体涉及一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法。

背景技术

随着化石燃料的不断消耗，全球范围内的能源危机和环境问题日益加剧。传统燃油型汽车作为化石燃料的一大消费者，面临着巨大的挑战。近年来，借助于电池、可再生能源并网技术的不断进步，电动汽车的发展引起了广泛的关注。伴随着电动汽车的快速发展，其对配电网增容、规划、建设、电能质量等方面的影响也越发突出。电动汽车的充放电接口作为电动汽车与电网之间的重要桥梁和纽带，其电路和先进控制策略具有重要的研究价值。一方面，电动汽车充电接口的交直流电能变换过程可能会给配电网带来大量的谐波污染。电网侧亟需一些电网友好、与电网互动的高性能并网接口，在保证电网电能质量的情况下，使电动汽车负荷具有一定的需求侧响应调节能力，并具有一定的惯性和阻尼，减轻电动汽车负荷对电网的影响。另一方面，为了适应电动汽车的实用化，其充放电接口及其控制技术也有待进一步的研究。

为了有效应对电动汽车的快速发展，使之成为更加符合电网需求的“模范负荷”，已有部分文献就此进行了研究，这些研究按充电功率的大小可以分为两大类。首先，对于充电功率要求不高的小功率慢充场合，电动汽车电网互动（Vehicle to Grid, V2G）、充电电路的设计等得到了广泛的研究。为了整合电动汽车的电池为电网提供必要的辅助服务，需要除电动汽车、电网外的第三方调度控制中心，增加了系统成本和问题的复杂性。在高压大功率的集中式快速充电应用场合，高压 DC/DC 变换器、电能质量治理等问题也得到了关注。然而现有研究很少考虑电动汽车的需求侧响应、电网友好等电网侧需求。在先进控制策略的作用下，若能将充放电电路等效为与电网交互的自治单元，并满足电网友好、需求侧响应等高级功能，对于加快电动汽车的发展和降低其对电网的影响都具有十分重要的意义。这不但能降低电动汽车高渗透率对配电网稳定和电能质量带来的不利影响，还能有效满足用户对快速恒功率充电的需求。借鉴传统电网中的同步电机技术，若能在虚拟电机控制策略的作用下将电动汽车的充放电电路接口等效控制为同步电机，即可自动地使其具有与电网间交互、需求侧响应等高级功能。

为了规范电动汽车充电设备的电压序列，美国汽车工程师协会推出了 SAE J1772 充电标准，规范指导电气接口电路的设计和制造。该标准将充电系统分为三个等级，即交流等级 1、交流等级 2 和直流等级，以分别满足常规充电和快速充电的不同需求。为了满足电动汽车常规充电的需求，该标准中的交流等级 1 和等级 2 要求充电设备从单相交流电网取电，且为电动汽车提供 2~8kW 的常规充电能力。为了满足电动汽车的快速充电需求，在直流等级中要求最大能为电动汽车提供 400A、240kW 的充电能力。该标准同时还规定直流等级充电设备的最低输入母线电压为 600V，而电动汽车电池的电压都较低，一般为 36V、48V、60V 和 72V 等。可见，为了满足充放电电路中直流母线与电动汽车电池之间的电压匹配，需要在两者之间引入大功率、宽输出电压范围的 DC/DC 变换器。

现有比较常见的电动汽车充电接口电路主要有图 1 所示三类。

1.带工频隔离的不控整流结构，如图 1（a）所示。该类接口电路的主要优点是：动态响应能力强、直流侧纹波电压小等。然而，由于隔离变压器的存在，使得整个系统体积偏大；此外，不可控整流器使得大量谐波电流注入电网，严重情况下，电流总畸变率（Total Harmonic Distortion, THD）可能超过 80%。

2.高频隔离的不控整流结构，如图 1（b）所示。由于采用了高频变压器隔离技术，系统的体积较工频隔离方式明显降低。然而，研究表明：该类接口电路的电流 THD 仍高达 30%。

3.高频隔离的 PWM 整流结构，如图 1（c）所示。由于整流器侧采用了 PWM 控制方式，能明显提高功率因数、降低电流 THD，且体积小、动态响应好。然而，该结构的充放电电路还无法达到电网交互、需求侧响应的目的。

发明内容

针对现有技术的不足，本发明的目的是提供一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法，通过虚拟电机技术使得电动汽车储能响应配网频率/电压变化，具备参与配网调节的能力。

本发明的目的是采用下述技术方案实现的：

本发明提供一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法，所述方法用的充电电路为高频隔离的 PWM 整流电路，所述 PWM 整流电路包括依次连接的交流接口和直流接口，所述交流接口采用 H 桥 AC/DC 整流电路，用于将电网电压整流为 600V 的直流电压；所述直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，用于将 600V 的直流电压转换为 48V 的直流电压，供给电动汽车负荷；

其改进之处在于，所述方法包括：

①对交流接口采用虚拟同步电机控制策略进行控制；

②对直流接口采用电压外环和电流内环的双环控制控制策略进行控制。

进一步地，所述交流接口的H桥AC/DC整流电路采用三相六桥臂结构，每个桥臂由IGBT模块组成，每个IGBT模块由IGBT器件以及与其反并联的二级管组成；所述H桥AC/DC整流电路与电容器支路C_{dc}并联；交流接口H桥AC/DC整流电路的三相分别对应与电网的三相连接；

所述直流接口的隔离型DC/DC变换器包括变压器、与变压器原边连接的两相H桥电路和与变压器副边连接的二极管滤波电路；所述两相H桥电路包括四个桥臂，每个桥臂由IGBT模块组成，每个IGBT模块由IGBT器件以及与其反并联的二级管组成；所述二极管滤波电路包括并联的二极管支路和电容支路；电感连接在二极管支路和电容支路之间；所述二极管支路由串联的二极管组成。

进一步地，所述①中：将电网并网点的电动汽车电动充电桩等效为虚拟同步电机，虚拟同步电机控制的数学模型如下：

虚拟同步电机的转矩方程表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt}=\omega \\ H\dfrac{d\omega}{dt}=T_e-T_m-T_d=T_e-T_m-D(\omega-\omega_0) \end{cases} \quad (1)；$$

其中：δ为虚拟同步电机的功角，单位为rad；ω为虚拟同步电机的角速度，ω_0为电网同步角速度，单位为rad/s；H为虚拟同步电机的惯性时间常数，单位为s；T_e、T_m和T_d分别为虚拟同步电机的电磁、机械转矩和阻尼转矩，单位为N·m；D为阻尼系数，单位为N·m·s/rad；其中，虚拟同步电机电磁转矩由虚拟同步电机三相电势e_a、e_b、e_c以及三相输出电流i_a、i_b、i_c得到，即$T_e=P_e/\omega=\left(e_a i_a+e_b i_b+e_c i_c\right)/\omega$；

虚拟同步电机的电磁方程表示为：

$$L\frac{di_{abc}}{dt}=e_{abc}-u_{abc}-Ri_{abc} \quad (2)；$$

其中，L和R分别为虚拟同步电机的定子电感和电阻，u_{abc}为虚拟同步电机的机端电压；e_{abc}为虚拟同步电机三相电势的简写；i_{abc}为三相输出电流i_a、i_b、i_c的简写；定子电感L和电阻R与交流接口的滤波电感和滤波器及IGBT器件的寄生电阻对应。

进一步地，交流接口根据电网的频率和电压调节其取用电网的有功和无功功率；

A、有功调节：

通过对虚拟同步电机机械转矩 T_m 的调节即实现交流接口中有功指令的调节；T_m 由额定转矩指令 T_0 和频率偏差反馈指令 ΔT 两部分组成，其中 T_0 表示为：

$$T_0 = P_{ref} / \omega \qquad (3)；$$

其中，P_{ref} 为并网逆变器的有功指令，在充放电电路中，P_{ref} 即为直流母线电压 PI 调节器的控制输出；频率响应的调节通过虚拟的调频单元来实现，虚拟的调频单元取为比例环节，即机械转矩偏差指令 ΔT 表示为：

$$\Delta T = k_f (f - f_0) \qquad (4)；$$

其中，f 为虚拟同步电机机端电压的频率，f_0 为电网额定频率，k_f 为频率响应系数，为恒定的负数；

B、无功调节：

通过调节虚拟同步电机模型的虚拟电势 E_p 来调节其机端电压和无功；

虚拟同步电机的虚拟电势指令 E_p 包括：电机的空载电势 E_0、反应无功功率调节电势 ΔE_Q 和反应机端电压调节电势 ΔE_U；

反应无功功率调节的部分电势 ΔE_Q 表示为：

$$\Delta E_Q = k_q (Q_{ref} - Q) \qquad (5)；$$

其中，k_q 为无功调节系数，ΔE_Q 为交流接口的无功指令，Q 为交流接口机端输出的瞬时无功功率，Q 表示为：

$$Q = \left[(u_a - u_b) i_c + (u_b - u_c) i_a + (u_c - u_a) i_b \right] / \sqrt{3} \qquad (6)；$$

其中：u_a、u_b 和 u_c 分别为虚拟同步电极的三相机端电压；

反应机端电压调节电势 ΔE_U，ΔE_U 等效为虚拟同步电机的自动励磁调节器，自动励磁调节器简化为比例环节，则 ΔE_U 表示为：

$$\Delta E_U = k_v (U_{ref} - U) \qquad (7)；$$

其中，U_{ref} 和 U 分别为并网逆变器机端线电压有效值的指令值和真实值，k_v 为电压调节系数；

虚拟同步电机电势为：

$$E_p = E_0 + \Delta E_Q + \Delta E_U \quad (8);$$

虚拟同步电机电势电压矢量为：

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E_p \sin(\delta) \\ E_p \sin(\delta - 2\pi/3) \\ E_p \sin(\delta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (9)。$$

进一步地，所述①中的虚拟同步电机控制策略为：在有功调节、无功调节以及机械方程和电磁方程获得虚拟同步电机暂态电势 E_p 和虚拟同步电机的功角 δ 后，在式（9）得到电势电压 e_{abc} 的基础上，由式（2）获得电网三相输出电流的指令值，然后在比例谐振控制策略的作用下保证实际并网三相输出电流 i_{abc} 对其指令值 i_{refabc} 的跟踪。

与现有技术比，本发明达到的有益效果是：

1、本发明提供一种电网友好的电动汽车储能充放电控制方法。该方法用的整流电路由交流接口和直流接口两部分组成，其中交流接口的三相 H 桥整流电路将电网电压整流为 600V 直流电压，再经过直流接口的大功率 DC/DC 变流器转换为 48V 的直流电压，供给电动汽车负荷。

2、交流接口采用虚拟同步电动机控制策略，可以响应电网电压/频率调整，为电网提供有功和无功支撑，改变了传统充电机功率单向流动不能参与配网调节的弊端，配合储能装置可显著提高充放电接口的惯性和阻尼。交流接口采用虚拟同步电动机控制策略使得并网点的电流畸变小且能为电网提供必要的电压和频率支撑，提高系统稳定性。

3、该控制方法可降低储能充放电接口对电网的影响，提升电网对大规模储能接入的适应性。直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，可以有效实现和电网之间的电气隔离，提高系统可靠性，且能满足储能电池快速恒功率充电的需求。

附图说明

图 1 是现有技术中电动汽车充电接口电路拓扑图，其中（a）为带工频隔离的不控整流拓扑结构图；（b）为高频隔离的不控整流拓扑结构图；（c）为高频隔离的 PWM 整流拓扑结构图；

图 2 是本发明提供的交流接口控制策略结构图；

图 3 是本发明提供的直流接口控制策略结构图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

本发明针对传统充电机能量单向流动、不能参与配网调节的问题，提供一种按照同步电机负荷的运行方式进行控制的电动汽车储能充放电控制方法。通过虚拟电机技术使得电动汽车储能响应配网频率/电压变化，具备参与配网调节的能力。

本发明依赖的硬件拓扑结构如图 1（C）所示；本发明方法用的充电电路为高频隔离的PWM 整流电路，所述 PWM 整流电路包括依次连接的交流接口和直流接口，所述交流接口采用 H 桥 AC/DC 整流电路，用于将电网电压整流为 600V 的直流电压；所述直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，用于将 600V 的直流电压转换为 48V 的直流电压，供给电动汽车负荷；交流接口的 H 桥 AC/DC 整流电路采用三相六桥臂结构，每个桥臂由 IGBT 模块组成，每个 IGBT 模块由 IGBT 器件以及与其反并联的二级管组成；所述 H 桥 AC/DC 整流电路与电容器支路 C_{dc} 并联；交流接口 H 桥 AC/DC 整流电路的三相分别对应与电网的三相连接；

直流接口的隔离型 DC/DC 变换器包括变压器、与变压器原边连接的两相 H 桥电路和与变压器副边连接的二极管滤波电路；所述两相 H 桥电路包括四个桥臂，每个桥臂由 IGBT 模块组成，每个 IGBT 模块由 IGBT 器件以及与其反并联的二级管组成；所述二极管滤波电路包括并联的二极管支路和电容支路；电感连接在二极管支路和电容支路之间；所述二极管支路由串联的二极管组成。

本发明提供的电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法包括：

①对交流接口采用虚拟同步电机控制策略进行控制；

在电网侧 AC/DC 交流接口中，采用虚拟同步电机控制策略。从并网点看进去，整个电动汽车充电桩可以等效为一台同步电机负荷，自适应地响应电网的电压/频率扰动，并为电网提供必要的惯性和阻尼。下面给出充放电方案中交流侧 AC/DC 接口的虚拟电机控制的数学模型。

虚拟同步电机的转矩方程表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = \omega \\ H\dfrac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - T_d = T_e - T_m - D(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (1)；$$

其中：δ 为虚拟同步电机的功角，单位为 rad；ω 为虚拟同步电机的角速度，ω_0 为电网同步角速度，单位为 rad/s；H 为虚拟同步电机的惯性时间常数，单位为 s；T_e、T_m 和 T_d 分别为虚拟同步电机的电磁、机械转矩和阻尼转矩，单位为 N·m；D 为阻尼系数，单位为 N·m·s/rad；

其中，虚拟同步电机电磁转矩由虚拟同步电机三相电势e_a、e_b、e_c以及三相输出电流i_a、i_b、i_c得到，即$T_e = P_e / \omega = \left(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c\right) / \omega$；由于常数$H$和$D$的存在，使得充电机在电网电压/频率扰动、负荷投切过程中表现出机械惯性和阻尼功率振荡的能力。

虚拟同步电机的电磁方程表示为：

$$L\frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \qquad (2);$$

其中，L和R分别为虚拟同步电机的定子电感和电阻，u_{abc}为虚拟同步电机的机端电压；e_{abc}为虚拟同步电机三相电势的简写；i_{abc}为三相输出电流i_a、i_b、i_c的简写；定子电感L和电阻R与交流接口的滤波电感和滤波器及IGBT器件的寄生电阻对应。

在所提虚拟电机控制策略作用下，图1（c）所示充放电电路交流接口与电网交互且满足电网需求侧响应的控制策略，主动地根据电网的频率和电压调节其取用电网的有功和无功功率。

A、有功调节：

在功率为P的恒功率负荷条件下，同步电机额定的机械转矩指令T_0与电网频率ω成反比，即$T_0\omega=P$；此外，同步电机在电网频率扰动后，其机械转矩还受到物理的阻尼作用而发生变化：电网频率越高，电机转速越快，空气摩擦等机械阻尼转矩也越大。这可以视作其对电网频率变化的响应。本发明通过对虚拟同步电机机械转矩T_m的调节即可实现交流接口中有功指令的调节。T_m由额定转矩指令T_0和频率偏差反馈指令ΔT两部分组成，其中T_0可以表示为：

$$T_0 = P_{ref} / \omega \qquad (3);$$

其中，P_{ref}为并网逆变器的有功指令，在充放电电路中，P_{ref}即为直流母线电压PI调节器的控制输出；频率响应的调节通过虚拟的调频单元来实现，虚拟的调频单元取为比例环节，即机械转矩偏差指令ΔT表示为：

$$\Delta T = k_f(f - f_0) \qquad (4);$$

其中，f为虚拟同步电机机端电压的频率，f_0为电网额定频率，k_f为频率响应系数，为恒定的负数。

B、无功调节：

同步电机通过励磁控制器来调节其无功输出及机端电压。类似地，可以通过调节虚拟同步电机模型的虚拟电势E_p来调节其机端电压和无功。

虚拟同步电机的虚拟电势指令E_p由三部分组成。其一，是电机的空载电势E_0。其二，是

反应无功功率调节的部分 ΔE_Q，可以表示为：

$$\Delta E_Q = k_q(Q_{ref} - Q) \quad (5)$$

其中，k_q 为无功调节系数，ΔE_Q 为交流接口的无功指令，Q 为交流接口机端输出的瞬时无功功率，Q 表示为：

$$Q = \left[(u_a - u_b)i_c + (u_b - u_c)i_a + (u_c - u_a)i_b\right]/\sqrt{3} \quad (6)$$

其中：u_a、u_b 和 u_c 分别为虚拟同步电极的三相机端电压；

虚拟电势指令 E_p 的第三部分为反应机端电压调节电势 ΔE_U，ΔE_U 等效为虚拟同步电机的自动励磁调节器（Autonomous voltage regulator, AVR），自动励磁调节器简化为比例环节，则 ΔE_U 表示为：

$$\Delta E_U = k_v(U_{ref} - U) \quad (7)$$

其中，U_{ref} 和 U 分别为并网逆变器机端线电压有效值的指令值和真实值，k_v 为电压调节系数；

虚拟同步电机电势为：

$$E_p = E_0 + \Delta E_Q + \Delta E_U \quad (8)$$

虚拟同步电机电势电压矢量为：

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E_p \sin(\delta) \\ E_p \sin(\delta - 2\pi/3) \\ E_p \sin(\delta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (9)。$$

基于以上分析，可以得到基于虚拟同步电机策略的交流接口控制策略，如图 2 所示。在有功、无功调节模块以及机械、电磁方程获得虚拟电机暂态电势 E_p 和功角 δ 之后，为了保证交流接口与电网之间的交互电流 i_{abc} 具有较低的总谐波畸变率，以满足电网友好的功能，在式(9)得到电势电压 e_{abc} 的基础上，由式(2)获得电网交互电流的指令值，然后在比例谐振控制策略的作用下保证实际并网电流 i_{abc} 对其指令值 i_{refabc} 的精确跟踪。据此，可以保证电网交互电流的低总谐波失真 THD、高功率因数运行。

②对直流接口采用电压外环和电流内环的双环控制控制策略进行控制：

基于图 1（c）的充放电电路接口，交流接口的直流输出电压为 U_{dc}=600V，不能直接接到电动汽车电池上，因此需要采用图 1（c）所示的大功率、宽输出电压范围的直流接口作为连接高压直流母线和电动汽车的桥梁和纽带。直流接口的控制策略采用电压外环 PI v 和电流内

环 PI i 的双环控制来实现，将直流接口的输出电压 U_o 稳定到其额定值 U_{oref} =48V，如图 3 所示，其中 D 为驱动图 1(c)DC/DC 变换器 IGBT 的占空比，I_d 为电动汽车的充电电流。

本发明提供的控制方法中，交流接口采用虚拟同步电动机技术，保证并网电流的低谐波畸变的同时，还可以响应电网电压/频率异常事件，为电网提供必要的有功和无功支撑，并提高充放电接口的惯性和阻尼。该控制方法可降低储能充放电接口对电网的影响，提升电网对大规模储能接入的适应性。直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，可以满足储能电池快速恒功率充电的需求。

最后应当说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员应当理解：依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

权 利 要 求

1、一种电动汽车储能充放电虚拟同步电机控制方法，所述方法用的充电电路为高频隔离的 PWM 整流电路，所述 PWM 整流电路包括依次连接的交流接口和直流接口，所述交流接口采用 H 桥 AC/DC 整流电路，用于将电网电压整流为 600V 的直流电压；所述直流接口采用隔离型 DC/DC 变换器，用于将 600V 的直流电压转换为 48V 的直流电压，供给电动汽车负荷；

其特征在于，所述方法包括：

①对交流接口采用虚拟同步电机控制策略进行控制；

②对直流接口采用电压外环和电流内环的双环控制策略进行控制。

2、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述交流接口的 H 桥 AC/DC 整流电路采用三相六桥臂结构，每个桥臂由 IGBT 模块组成，每个 IGBT 模块由 IGBT 器件以及与其反并联的二级管组成；所述 H 桥 AC/DC 整流电路与电容器支路 C_{dc} 并联；交流接口 H 桥 AC/DC 整流电路的三相分别对应与电网的三相连接；

所述直流接口的隔离型 DC/DC 变换器包括变压器、与变压器原边连接的两相 H 桥电路和与变压器副边连接的二极管滤波电路；所述两相 H 桥电路包括四个桥臂，每个桥臂由 IGBT 模块组成，每个 IGBT 模块由 IGBT 器件以及与其反并联的二级管组成；所述二极管滤波电路包括并联的二极管支路和电容支路；电感连接在二极管支路和电容支路之间；所述二极管支路由串联的二极管组成。

3、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述①中：将电网并网点的电动汽车电动充电桩等效为虚拟同步电机，虚拟同步电机控制的数学模型如下：

虚拟同步电机的转矩方程表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = \omega \\ H\dfrac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - T_d = T_e - T_m - D(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (1)；$$

其中：δ 为虚拟同步电机的功角，单位为 rad；ω 为虚拟同步电机的角速度，ω_0 为电网同步角速度，单位为 rad/s；H 为虚拟同步电机的惯性时间常数，单位为 s；T_e、T_m 和 T_d 分别为虚拟同步电机的电磁、机械转矩和阻尼转矩，单位为 N·m；D 为阻尼系数，单位为 N·m·s/rad；其中，虚拟同步电机电磁转矩由虚拟同步电

机三相电势e_a、e_b、e_c以及三相输出电流i_a、i_b、i_c得到，即

$T_e = P_e / \omega = \left(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c\right) / \omega$；

虚拟同步电机的电磁方程表示为：

$$L\frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \qquad (2)$$；

其中，L和R分别为虚拟同步电机的定子电感和电阻，u_{abc}为虚拟同步电机的机端电压；e_{abc}为虚拟同步电机三相电势的简写；i_{abc}为三相输出电流i_a、i_b、i_c的简写；定子电感L和电阻R与交流接口的滤波电感和滤波器及IGBT器件的寄生电阻对应。

4、如权利要求3所述的控制方法，其特征在于，交流接口根据电网的频率和电压调节其取用电网的有功和无功功率；

A、有功调节：

通过对虚拟同步电机机械转矩T_m的调节即实现交流接口中有功指令的调节；T_m由额定转矩指令T_0和频率偏差反馈指令ΔT两部分组成，其中T_0表示为：

$$T_0 = P_{ref} / \omega \qquad (3)$$；

其中，P_{ref}为并网逆变器的有功指令，在充放电电路中，P_{ref}即为直流母线电压PI调节器的控制输出；频率响应的调节通过虚拟的调频单元来实现，虚拟的调频单元取为比例环节，即机械转矩偏差指令ΔT表示为：

$$\Delta T = k_f (f - f_0) \qquad (4)$$；

其中，f为虚拟同步电机机端电压的频率，f_0为电网额定频率，k_f为频率响应系数，为恒定的负数；

B、无功调节：

通过调节虚拟同步电机模型的虚拟电势E_p来调节其机端电压和无功；

虚拟同步电机的虚拟电势指令E_p包括：电机的空载电势E_0、反应无功功率调节电势ΔE_Q和反应机端电压调节电势ΔE_U；

反应无功功率调节的部分电势ΔE_Q表示为：

$$\Delta E_Q = k_q(Q_{ref} - Q) \quad (5);$$

其中，k_q 为无功调节系数，ΔE_Q 为交流接口的无功指令，Q 为交流接口机端输出的瞬时无功功率，Q 表示为：

$$Q = \left[(u_a - u_b)i_c + (u_b - u_c)i_a + (u_c - u_a)i_b\right]/\sqrt{3} \quad (6);$$

其中：u_a、u_b 和 u_c 分别为虚拟同步电极的三相机端电压；

反应机端电压调节电势 ΔE_U，ΔE_U 等效为虚拟同步电机的自动励磁调节器，自动励磁调节器简化为比例环节，则 ΔE_U 表示为：

$$\Delta E_U = k_v(U_{ref} - U) \quad (7);$$

其中，U_{ref} 和 U 分别为并网逆变器机端线电压有效值的指令值和真实值，k_v 为电压调节系数；

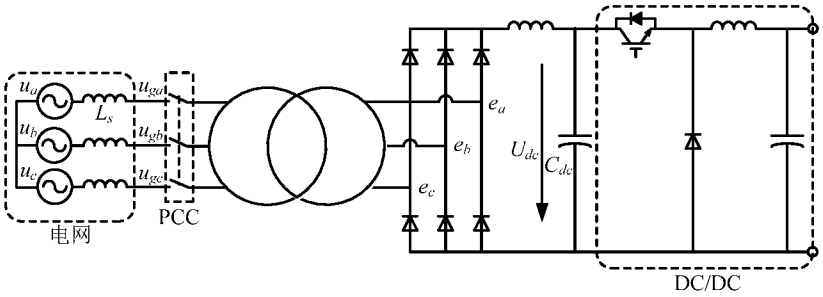
虚拟同步电机电势为：

$$E_p = E_0 + \Delta E_Q + \Delta E_U \quad (8);$$

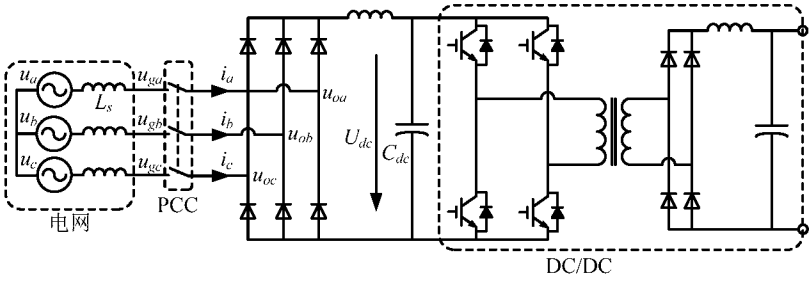
虚拟同步电机电势电压矢量为：

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E_p \sin(\delta) \\ E_p \sin(\delta - 2\pi/3) \\ E_p \sin(\delta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (9)。$$

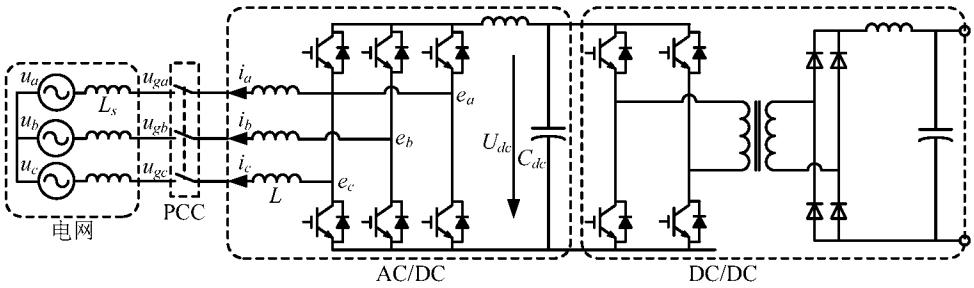
5、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述①中的虚拟同步电机控制策略为：在有功调节、无功调节以及机械方程和电磁方程获得虚拟同步电机暂态电势 E_p 和虚拟同步电机的功角 δ 后，在式（9）得到电势电压 e_{abc} 的基础上，由式（2）获得电网三相输出电流的指令值，然后在比例谐振控制策略的作用下保证实际并网三相输出电流 i_{abc} 对其指令值 i_{refabc} 的跟踪。


u_a
u_b
u_c
L_s
u_{ga}
u_{gb}
u_{gc}
电网
PCC
e_a
e_b
e_c
U_{dc}
C_{dc}
DC/DC

（a）


u_a
u_b
u_c
L_s
u_{ga}
u_{gb}
u_{gc}
电网
PCC
i_a
i_b
i_c
u_{oa}
u_{ob}
u_{oc}
U_{dc}
C_{dc}
DC/DC

（b）


u_a
u_b
u_c
L_s
u_{ga}
u_{gb}
u_{gc}
电网
PCC
i_a
i_b
i_c
L
e_a
e_b
e_c
U_{dc}
C_{dc}
AC/DC
DC/DC

（c）

图 1

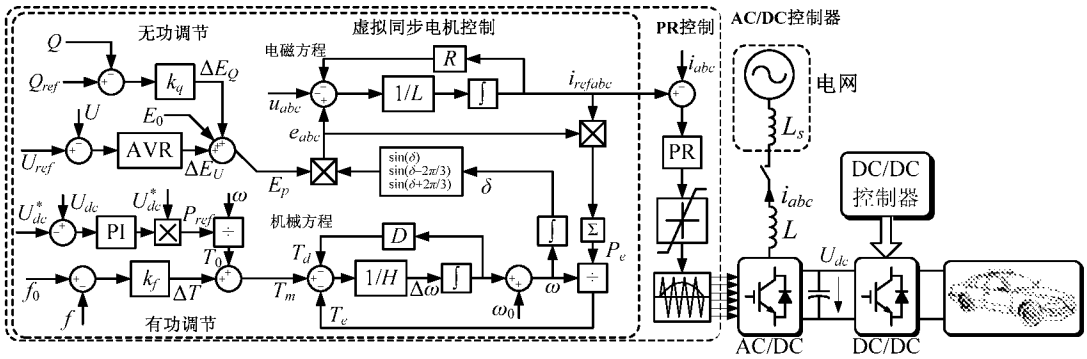

无功调节
虚拟同步电机控制
PR控制
AC/DC控制器
电磁方程
机械方程
有功调节
Q
Q_{ref}
k_q
ΔE_Q
U
U_{ref}
AVR
E_0
ΔE_U
E_p
U_{dc}^*
U_{dc}
PI
P_{ref}
ω
T_0
f_0
f
k_f
ΔT
T_m
T_d
T_e
D
1/H
$\Delta\omega$
ω_0
P_e
R
1/L
u_{abc}
e_{abc}
i_{refabc}
δ
i_{abc}
PR
电网
L_s
L
DC/DC
控制器
AC/DC
DC/DC

图 2

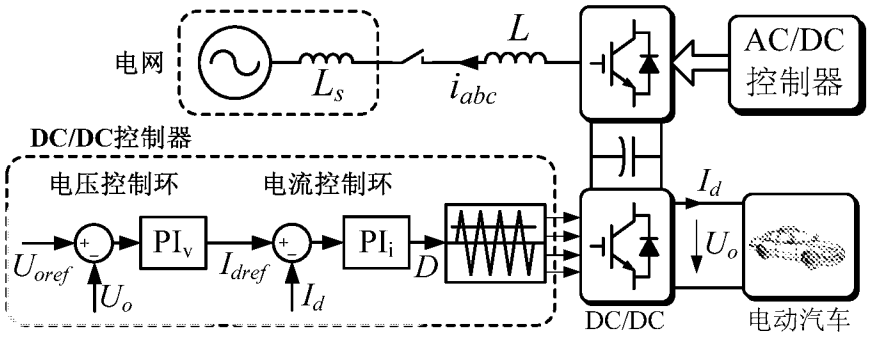

电网
L_s
L
i_{abc}
AC/DC
控制器
DC/DC控制器
电压控制环
电流控制环
U_{oref}
U_o
PI_v
I_{dref}
I_d
PI_i
D
I_d
U_o
DC/DC
电动汽车

图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2014/093002

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 7/10 (2006.01) i; H01M 10/44 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02J; H01M

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

DWPI, CNABS, WOTXT, CNTXT, CNKI: electric vehicle, PWM, high frequency, isolate, virtual synchronous motor, double loop, automobile, car, vehicle, charge, rectifier, virtual, synchronous

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 102222958 A (GRADUATE SCHOOL AT SHENZHEN, TSINGHUA UNIVERSITY et al.), 19 October 2011 (19.10.2011), description, paragraphs [0021]-[0031], and figures 1-7	1-5
Y	ZHANG, Hao et al., "Research on the DPC with Fixed Switching Frequency of Three-level PWM Rectifier Based on Virtual Flux", POWER ELECTRONICS, no. 2, vol. 47, 28 February 2013 (28.02.2013), ISSN: ISSN: 1000-100X, pages 82-84	1-5
Y	PENG, Cheng et al., "Microgrid Inverter Control Based on Virtual Synchronous Generator Principle and Its Simulation Analysis", JOURNAL OF ELECTRIC POWER SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol. 26, no. 2, 30 June 2011 (30.06.2011), ISSN: ISSN: 1673-9140, pages 85-87	3-4
A	CN 203466574 U (ZHAOQING BUSINESS ALLIANCE INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD.), 05 March 2014 (05.03.2014), the whole document	1-5

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
02 February 2015 (02.02.2015)	**26 February 2015 (26.02.2015)**
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer **HAN, Beibei** Telephone No.: (86-10) **62089273**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2014/093002

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102222958 A	19 October 2011	CN 102222958 B	16 October 2013
CN 203466574 U	05 March 2014	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2014/093002

A. 主题的分类

H02J 7/10(2006.01)i; H01M 10/44(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02J; H01M

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

DWPI,CNABS,WOTXT,CNTXT,CNKI：电动汽车，充电，PWM，整流器，高频，隔离，虚拟同步电机，双环，automobile, car, vehicle, charge, rectifier, virtual, synchronous

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 102222958 A (清华大学深圳研究生院 等) 2011年 10月 19日 (2011-10-19) 说明书第[0021]-[0031]段，图1-7	1-5
Y	张豪等. "基于虚拟磁链的三电平PWM整流器定频DPC" 电力电子技术, 第第2期卷，第第47卷期，2013年 2月 28日 (2013-02-28), ISSN：ISSN：1000-100X, 第82-84页	1-5
Y	彭铖等. "基于虚拟同步电机原理的微网逆变器控制及其仿真分析" 电力科学与技术学报, 第第26卷卷，第第2期期，2011年 6月 30日 (2011-06-30), ISSN：ISSN：1673-9140, 第85-87页	3-4
A	CN 203466574 U (肇庆全商联盟信息科技有限公司) 2014年 3月 5日 (2014-03-05) 全文	1-5

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2015年 2月 2日	2015年 2月 26日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 中国	韩蓓蓓
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (86-10)62089273

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2014/093002

检索报告引用的专利文件	公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN 102222958 A	2011年 10月 19日	CN 102222958 B	2013年 10月 16日
CN 203466574 U	2014年 3月 5日	无	