

(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
2018 年 10 月 18 日 (18.10.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/188393 A1

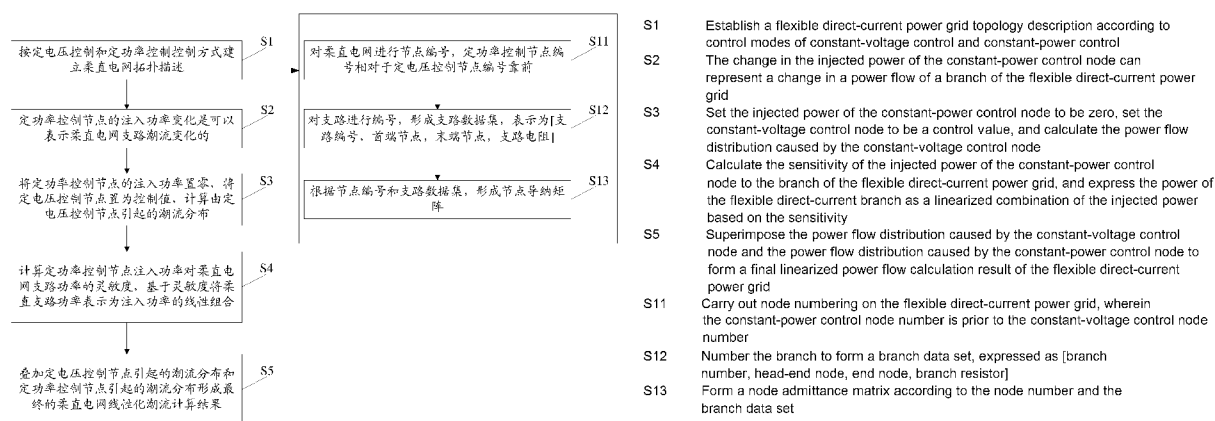
- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/06 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/071935
- (22) 国际申请日: 2018 年 1 月 9 日 (09.01.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710239444.4 2017 年 4 月 13 日 (13.04.2017) CN
- (71) 申请人: 中国电力科学研究所有限公司 (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE COMPANY LIMITED) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 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)。 国网上海市电力公司 (STATE GRID SHANGHAI MUNICIPAL ELECTRIC POWER COMPANY) [CN/CN]; 中国上海市南京东路 181 号, Shanghai 200002 (CN)。

(72) 发明人: 许丹 (XU, Dan); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 戴赛 (DAI, Sai); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 崔晖 (CUI, Hui); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 张传成 (ZHANG, Chuancheng); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 黄国栋 (HUANG, Guodong); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 门德月 (MEN, Deyue); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 丁

(54) Title: LINEARIZED DETERMINATION METHOD AND SYSTEM FOR POWER FLOW OF FLEXIBLE DIRECT-CURRENT POWER GRID, AND COMPUTER STORAGE MEDIUM

(54) 发明名称: 柔性直流电网潮流线性化确定方法及系统、计算机存储介质



(57) Abstract: A linearized determination method and system for a power flow of a flexible direct-current power grid, and a computer storage medium. The method comprises: according to a control mode, decomposing a power flow of a flexible direct-current power grid into: a power flow distribution of a constant-voltage control node and a power flow distribution of a constant-power control node; calculating the power flow distribution of the constant-voltage control node; calculating the power flow distribution of the constant-power control node; and superimposing the power flow distribution of the constant-voltage control node and the power flow distribution of the constant-power control node to calculate a final linearized power flow result of the flexible direct-current power grid.

(57) 摘要: 一种柔性直流电网潮流线性化确定方法及系统、计算机存储介质, 包括: 依据控制方式将柔性直流电网潮流分解为: 定电压控制节点潮流分布和定功率控制节点潮流分布; 计算定电压控制节点的潮流分布; 计算定功率控制节点的潮流分布; 叠加定电压控制节点的潮流分布和定功率控制节点的潮流分布计算最终的柔性直流电网线性化潮流结果。



强(DING, Qiang); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。朱泽磊(ZHU, Zelei); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。蔡帜(CAI, Zhi); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。李博(LI, Bo); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。胡晨旭(HU, Chenxu); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。燕京华(YAN, Jinghua); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。张加力(ZHANG, Jiali); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。李培军(LI, Peijun); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。孙振(SUN, Zhen); 中国北京市海淀区清河小营东路15号, Beijing 100192 (CN)。

(74) 代理人: 北京派特恩知识产权代理有限公司(CHINA PAT INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE); 中国北京市海淀区海淀南路21号中关村知识产权大厦B座2层, Beijing 100080 (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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。

(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))。

柔性直流电网潮流线性化确定方法及系统、计算机存储介质

相关申请的交叉引用

本申请基于申请号为 201710239444.4、申请日为 2017 年 04 月 13 日的中国专利申请提出，并要求该中国专利申请的优先权，该中国专利申请的全部内容在此引入本申请作为参考。

技术领域

本申请涉及电力工业领域的柔性直流电网潮流计算方法，具体涉及一种柔性直流电网潮流线性化确定方法及系统、计算机存储介质。

背景技术

随着风光等清洁能源将继续快速发展。各种大规模可再生能源接入电网，传统的电力设备、电网结构和运行技术等在接受超大规模可再生能源方面越来越力不从心，有必要研发新技术、新装备和新电网结构来满足未来能源格局的深刻变化。而基于柔性直流的多端直流输电系统和直流电网技术是解决这一问题的有效技术手段之一。柔直电网调度计划作为柔直电网调度运行的重要组成部分，是保障柔直电网安全经济运行的重要环节。在常规交流电网的调度计划业务中，其依托的核心技术是安全约束机组组合和安全约束经济调度，技术的关键点之一就是“电网安全约束”，处理方式是依据高电压等级潮流计算的特点，将交流电网潮流计算线性化，从而构建考虑潮流约束的线性优化模型。在柔直电网中，由于潮流计算与交流电网相差迥异，因此交流电网中的潮流线性化方法已不适应柔直电网。

发明内容

为解决上述技术问题，本申请实施例提供了一种柔性直流电网潮流线性化确定方法及系统、计算机存储介质。

本申请实施例的技术方案是一种考虑柔性直流电网控制方式，基于注入功率描述和节点电压控制的柔直电网线性潮流计算方法。

本申请实施例提供的柔性直流电网潮流线性化计算方法，包括：

将柔性直流电网潮流分解为：定电压控制节点潮流分布和定功率控制节点潮流分布；

将定功率控制节点的注入功率置零，将定电压控制节点置为控制值，
10 计算定电压控制节点的潮流分布；

基于注入功率对柔性直流电网支路功率的灵敏度，计算定功率控制节点的潮流分布；

叠加定电压控制节点的潮流分布和定功率控制节点的潮流分布计算最终的柔性直流电网线性化潮流结果。

15 在一实施方式中，在将柔性直流电网潮流按照控制方式分解之前，所述方法还包括：

对柔性直流电网的节点编号，定功率控制节点编号在定电压控制节点编号之前；

对柔性直流电网的支路编号，形成支路数据集，表示为[支路编号，首
20 端节点，末端节点，支路电阻]；

根据节点编号和支路数据集，形成节点导纳矩阵。

在一实施方式中，所述计算定电压控制节点的潮流分布，包括：

将定功率控制节点的所有注入功率设置为零；

将定电压控制节点的电压设置为已知的控制值，求解非线性方程组，
25 得到所有支路定电压控制节点的潮流分布 $P_{i,v}$ 。

在一实施方式中, 所述计算定功率控制节点的潮流分布, 包括:

计算定功率控制节点注入功率对柔性直流电网支路功率的灵敏度;

基于灵敏度将柔性直流电网支路功率表示为注入功率的线性组合。

在一实施方式中, 所有定功率控制节点对柔性直流电网中任意一条支

5 路的潮流灵敏度, 根据下式计算得到:

$$\lambda_{i,l} = \frac{\partial P_{l,km}}{\partial P_i} = \frac{G_{k,m} \cdot (2 \frac{\partial V_k}{\partial V_i} - \frac{\partial V_m}{\partial V_i} - \frac{\partial V_k}{\partial V_i})}{2 \cdot G_{i,i} - \sum_{j \in I} G_{i,j} - \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}} = \frac{G_{k,m} \cdot (\frac{\partial V_k}{\partial V_i} - \frac{\partial V_m}{\partial V_i})}{G_{i,i} - \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}}$$

将柔性直流电网支路功率 $P_{l,p}$ 表示为注入功率的线性组合, 根据下式计算得到:

$$P_{l,p} = \sum_{i \in A} \lambda_{i,l} \cdot P_i$$

10 式中: $P_{l,km}$ 为节点 k、m 所在支路的注入功率, P_i 为节点 i 的注入功率, $\lambda_{i,l}$ 为节点 i 对支路 l 的灵敏度, $i \in A$ 表示所有定功率控制节点, V_i 为节点 i 的电压, V_k 为节点 k 的电压, V_m 为节点 m 的电压, G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导值, 对应所述节点导纳矩阵的值取负, $j \in I$, 表示与节点 i 直接相邻的节点, G_{ii} 为节点 i 的自导纳; $P_{l,p}$ 为定功率控制节点的潮流分布, i、j、k、
15 m 均为定功率控制节点。

在一实施方式中, 当柔性直流电网各节点电压相等时, 所述柔性直流电网线性化潮流结果, 根据下式计算得到:

$$P_l = P_{l,v} + P_{l,p}$$

20 式中: $P_{l,v}$ 表示定电压控制节点的潮流分布, $P_{l,p}$ 为柔性直流电网支路功率, P_l 为柔性直流电网线性化潮流结果。

本申请实施例提供的柔性直流电网潮流线性化计算系统, 包括:

分解模块, 配置为将柔性直流电网潮流分解为: 定电压控制节点潮流分布和定功率控制节点潮流分布;

第一计算模块,配置为计算定电压控制节点的潮流分布;

第二计算模块,配置为计算定功率控制节点的潮流分布;

第三计算模块,配置为叠加定电压控制节点的潮流分布和定功率控制节点的潮流分布计算最终的柔性直流电网线性化潮流结果。

5 在一实施方式中,所述第一计算模块包括:

设置模块,配置为将定功率控制节点的所有注入功率设置为 0;

支路的潮流分布计算模块,配置为将所有将定电压控制节点的电压设置为已知的控制值,求解非线性方程组,计算所有支路的潮流分布 $P_{i,v}$ 。

10 在一实施方式中,所述系统还包括:柔性直流电网描述模块,配置为在将柔性直流电网潮流按照控制方式分解之前,对柔性直流电网的节点编号,定功率控制节点编号在定电压控制节点编号之前;对柔性直流电网的支路编号,形成支路数据集,表示为[支路编号,首端节点,末端节点,支路电阻];根据节点编号和支路数据集,形成节点导纳矩阵。

在一实施方式中,所述第二计算模块包括:

15 灵敏度计算模块,配置为计算定功率控制节点注入功率对柔性直流电网中任意一条支路功率的灵敏度;

线性组合计算模块,配置为基于灵敏度将柔性直流电网支路功率表示为注入功率的线性组合。

20 与最接近的现有技术相比,本申请实施例提供的技术方案具有的有益效果是:

1、传统的基于注入功率的柔直电网的潮流计算是一个非线性模型,当需要通过调整注入功率调节柔直电网支路潮流时,无法对其进行线性表达,分析存在困难。本申请实施例能对柔直电网潮流计算线性化的方法,是构建柔性直流电网安全约束经济调度模型的关键技术之一。

25 2、柔直电网的调度计划当考虑安全约束时,不实现柔直潮流的线性化

表达则无法通过现有的线性化建模方式实现优化调度。本申请实施例是以后总考虑柔性直流电网控制方式的，基于注入功率描述和节点电压控制的柔直电网线性潮流计算方法。

3、通过本申请实施例，可以将直流电网定功率控制节点对支路潮流的影响进行线性描述，为直流电网的快速潮流计算及潮流控制提供了可行的技术手段。

附图说明

图 1 是本申请实施例的柔性直流电网潮流线性化确定方法的流程图；

图 2 是本申请实施例的 5 节点柔直电网示意图；

10 图 3 是本申请实施例的柔性直流电网潮流线性化确定系统的结构框图。

具体实施方式

下面结合附图对本申请的具体实施方式作进一步的详细说明。

以下描述和附图充分地示出本申请的具体实施方案，以使本领域的技术人员能够实践它们。其他实施方案可以包括结构的、逻辑的、电气的、过程的以及其他的改变。实施例仅代表可能的变化。除非明确要求，否则单独的组件和功能是可选的，并且操作的顺序可以变化。一些实施方案的部分和特征可以被包括在或替换其他实施方案的部分和特征。本申请的实施方案的范围包括权利要求书的整个范围，以及权利要求书的所有可获得的等同物。在本文中，本申请的这些实施方案可以被单独地或总地用术语“发明”来表示，这仅仅是为了方便，并且如果事实上公开了超过一个的发明，不是要自动地限制该应用的范围为任何单个发明或发明构思。

实施例一、

本申请实施例提供了一种考虑柔性直流电网控制方式的，基于注入功率描述和节点电压控制的柔直电网线性潮流计算方法，其流程图如图 1 所

示, 包括下述步骤:

S1: 按定电压控制和定功率控制控制方式建立柔直电网拓扑描述:

本申请实施例以图 2 所示的 5 节点柔直电网结构图为例开展后续描述, 任意节点数及任意连接方式的柔直电网可以此类推得到相应结果。柔直电
5 网的拓扑描述与常规交流电网拓扑描述并无不同, 为保证内容描述的完整性, 在此依然做简要描述。

S11, 对柔直电网进行节点编号, 定功率控制节点编号相对于定电压控制节点编号靠前, 如图 2 所示, 节点 1、2、3 为定功率控制, 节点 4、5 为定电压控制。

10 S12, 对支路进行编号, 形成支路数据集, 表示为[支路编号, 首端节点, 末端节点, 支路电阻]。对于图 2 中的支路 1, 则表示为: [1, 1, 2, 2.35] 。

S13, 根据节点编号和支路数据集, 形成节点导纳矩阵, 节点导纳阵的形成方式及物理意义在电力系统分析书中多有介绍, 在此不再赘述。对于图 2 所示电路, 导纳矩阵如式 (1) 所示。

$$15 \quad \begin{bmatrix} 1.782 & -0.426 & -0.556 & -0.800 & 0 \\ -0.426 & 1.573 & -0.606 & 0 & -0.541 \\ -0.556 & -0.606 & 1.162 & 0 & 0 \\ -0.800 & 0 & 0 & 1.265 & -0.465 \\ 0 & -0.541 & 0 & -0.465 & 1.006 \end{bmatrix} \quad (1)$$

S2: 定功率控制节点的注入功率变化是可以表示柔直电网支路潮流变化的。但定电压控制的节点则不行。为了能将柔直电网的支路潮流分布进行线性化表达, 本申请实施例提出将支路潮流分成 2 个组成部分: 定电压控制节点引起的潮流分布, 定功率控制节点引起的潮流分布。

20 其中柔直电网潮流计算相关推导如下:

为了清晰的描述本申请实施例的后续内容, 需要对柔直电网的潮流计算进行相关推导, 推导过程如下。

柔直电网中节点 i 和节点 j 之间的支路 l 的功率可表示为:

$$P_{l,ij} = (V_i - V_j) \cdot G_{i,j} \cdot V_i \quad (2)$$

式中, $P_{l,ij}$ 为支路 l 的潮流, V_i 为节点 i 的电压, G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导值, 他就是节点导纳阵中所对应的值取负。

柔直电网中节点 i 的注入功率可以表示成与节点 i 相连的所有支路的功率之和:

$$P_i = \sum_{j \in I} (V_i - V_j) \cdot G_{i,j} \cdot V_i \quad (3)$$

式中, P_i 为节点 i 的注入功率, $j \in I$, 表示与节点 i 直接相邻的节点, 将式 (3) 进行展开分析:

$$P_i = V_i^2 \cdot G_{i,i} - V_i \cdot \sum_{j \in I} V_j \cdot G_{i,j} \quad (4)$$

10 式中, G_{ii} 为节点 i 的自导纳, 他就是节点导纳阵中所对应的值。式中第一项只与节点 i 自身的电压相关, 而第二项则与相邻节点的电压相关。对式 (4) 求 V_i 的偏导数。再对任意支路求 V_i 的偏导数。

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i \cdot G_{i,i} - \sum_{j \in I} V_j \cdot G_{i,j} - V_i \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j} \quad (5)$$

$$\beta_{i,l} = \frac{\partial P_{l,km}}{\partial V_i} = G_{k,m} \cdot (2V_k \cdot \frac{\partial V_k}{\partial V_i} - V_k \cdot \frac{\partial V_m}{\partial V_i} - V_m \cdot \frac{\partial V_k}{\partial V_i}) \quad (6)$$

15 式 (6) 描述了任意支路功率对节点电压的偏导数, 即节点电压对支路潮流的灵敏度。如果能求出式 (6) 右侧值, 则表示支路的功率变化可以用节点的电压变化进行描述。将式 (6) 除以式 (5) 则可以得到任意支路功率对节点 i 注入功率的偏导数, 即节点注入功率对支路功率的灵敏度。

$$\lambda_{i,l} = \frac{\partial P_{l,km}}{\partial P_i} = \frac{G_{k,m} \cdot (2V_k \cdot \frac{\partial V_k}{\partial V_i} - V_k \cdot \frac{\partial V_m}{\partial V_i} - V_m \cdot \frac{\partial V_k}{\partial V_i})}{2V_i \cdot G_{i,i} - \sum_{j \in I} V_j \cdot G_{i,j} - V_i \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}} \quad (7)$$

20 如果能够求出式 (7) 右侧的值, 则表示支路的功率变化可以用节点注入功率的变化进行描述。

对于式 (6) 和式 (7) 的求取, 则跟节点的控制方式密切相关。首先,

任意一个节点式 (6) 和式 (7) 只需求解一个, 当该节点为定电压控制时, 求取式 (6); 当该节点为定功率控制时, 需要求取式 (7)。

我们首先分析式 (6) 的特点。由于式中既包含电压本身, 又包含电压的导数, 可知, 只有在极小的电压变化区间内, 节点电压对支路潮流的灵敏度才可以进行线性表达。因此, 在此我们不计算式 (6) 的值, 我们认为所有定电压控制的节点电压均为已知值, 不做定电压控制节点电压变化对支路潮流的影响分析。

S3: 将定功率控制节点的注入功率置零, 将定电压控制节点置为控制值, 计算由定电压控制节点引起的潮流分布:

分析式 (7) 的特点, 柔直电网在正常运行时, 无论节点是何种控制方式, 各节点电压相差很小, 假设各节点电压相等, 则式 (7) 可化简为:

$$\lambda_{i,l} = \frac{\partial P_{l,km}}{\partial P_i} = \frac{G_{k,m} \cdot (2 \frac{\partial V_k}{\partial V_i} - \frac{\partial V_m}{\partial V_i} - \frac{\partial V_k}{\partial V_i})}{2 \cdot G_{i,i} - \sum_{j \in I} G_{i,j} - \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}} = \frac{G_{k,m} \cdot (\frac{\partial V_k}{\partial V_i} - \frac{\partial V_m}{\partial V_i})}{G_{i,i} - \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}} \quad (8)$$

再对式 (8) 进行求解, 此时式 (8) 中, 节点 k, m 及与 i 相邻的各节点对 V_i 的偏导数都是待求变量。当在求 $\frac{\partial P_{l,km}}{\partial P_i}$ 时, 除了节点 i 我们假设其他定功率控制的节点注入功率是不变的。因此其它节点注入功率对 V_i 的偏导数等于 0。即如下式所示。

$$\frac{\partial P_c}{\partial V_i} = 2 \cdot V_c \cdot \frac{\partial V_c}{\partial V_i} \cdot G_{cc} - \frac{\partial V_c}{\partial V_i} \cdot \sum_{j \in c} V_j \cdot G_{cj} - V_c \cdot \sum_{j \in c} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{cj} = 0 \quad c \in [\text{定功率控制节点}] \quad (9)$$

在分析式 (9) 时, 再次假设各节点电压相差不大, 则式 (9) 可化简为:

$$\frac{\partial P_c}{\partial V_i} = \frac{\partial V_c}{\partial V_i} \cdot G_{cc} - \sum_{j \in c} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{cj} = 0 \quad c \in [\text{定功率控制节点}] \quad (10)$$

式 (10) 其实是一个方程组, 这个方程组中除了节点 i 自身, 其他各节点 $\frac{\partial V_n}{\partial V_i}$ 都是未知数。一个 n 节点的系统, 则有 $n-1$ 个未知数, 假设定功率控

制的节点有 a 个 (不含 i 节点), 定电压控制的节点有 $(n-1-a)$ 个。根据式 (10) 可获得 a 个方程, 而由于剩余 $(n-1-a)$ 个节点由于是定电压控制, 电压不受其他节点的影响, 直接可得 $\frac{\partial V_n}{\partial V_i} = 0$ 。综合分析可知, $n-1$ 个未知数正好对应 $n-1$ 个方程, 可求得所有 $\frac{\partial V_n}{\partial V_i}$ 的值。同时表明, 根据式 (8) 则可以

5 求得所有支路功率变化对节点 i 注入功率变化的比例值, 这也表明支路的功率变化可以用定功率控制节点的注入功率变化进行线性表达。至此, 节点注入功率对支路潮流的灵敏度计算说明结束。

步骤 S3 中, 首先将定功率控制节点的所有注入功率设置为 0;

10 将定电压控制节点的电压设置为已知的控制值, 运用传统数值解法求解非线性方程组, 求得所有支路的潮流。将此支路潮流表示为 $P_{l,v}$, 它表示由定电压控制节点所引起的潮流分布。

S4: 计算定功率控制节点注入功率对柔直电网支路功率的灵敏度, 基于灵敏度将柔直支路功率表示为注入功率的线性组合:

15 在此步骤中, 首先按照第 (2) 节中求取式 (8) 的方式求得所有定功率控制的节点对支路 l 的潮流灵敏度, 此时求的支路潮流表示为 $P_{l,p}$, 它表示由定功率控制的节点所引起的潮流分布。它的计算表达式为:

$$P_{l,p} = \sum_{i \in A} \lambda_{i,l} \cdot P_i \quad (11)$$

20 式中 P_i 为节点 i 的注入功率, $\lambda_{i,l}$ 为节点 i 对支路 l 的灵敏度。 $i \in A$ 表示所有定功率控制节点。这表明, 任意给定一个 P_i , 就可以直接线性求取对应的支路潮流 P_l 。

S5: 叠加定电压控制节点引起的潮流分布和定功率控制节点引起的潮流分布形成最终的柔直电网线性化潮流计算结果:

结合步骤 S3 和步骤 S4 即可求得此时支路潮流的线性表达式为:

$$P_l = P_{l,v} + P_{l,p} \quad (12)$$

实施例二、

下面以图 2 中 5 节点柔直电网示意图为例说明整个计算过程。首先以图中所示，节点 1、2、3 为定功率控制节点，节点 4、5 为定电压控制节点，节点 4 控制电压为 319.5kv，节点 5 控制电压为 320kv。首先根据公式 (10) 分别对节点 1、2、3 列方程组如下所示：

$$\begin{cases} 1.573 \cdot \frac{\partial V_2}{\partial V_1} - 0.606 \cdot \frac{\partial V_3}{\partial V_1} = 0.426 \\ -0.606 \cdot \frac{\partial V_2}{\partial V_1} + 1.162 \cdot \frac{\partial V_3}{\partial V_1} = 0.556 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} 1.782 \cdot \frac{\partial V_1}{\partial V_2} - 0.556 \cdot \frac{\partial V_3}{\partial V_2} = 0.426 \\ -0.556 \cdot \frac{\partial V_1}{\partial V_2} + 1.162 \cdot \frac{\partial V_3}{\partial V_2} = 0.606 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} 1.782 \cdot \frac{\partial V_1}{\partial V_3} - 0.426 \cdot \frac{\partial V_2}{\partial V_3} = 0.556 \\ -0.426 \cdot \frac{\partial V_1}{\partial V_3} + 1.573 \cdot \frac{\partial V_2}{\partial V_3} = 0.606 \end{cases} \quad (15)$$

根据方程式 (13) 可求得 $\frac{\partial V_2}{\partial V_1} = 0.5696$ ， $\frac{\partial V_3}{\partial V_1} = 0.7755$ ，根据方程式 (14) 可

求得 $\frac{\partial V_1}{\partial V_2} = 0.4723$ ， $\frac{\partial V_3}{\partial V_2} = 0.7475$ ，根据方程式 (15) 可求得 $\frac{\partial V_1}{\partial V_3} = 0.4321$ ， $\frac{\partial V_2}{\partial V_3} = 0.5023$ 。

由求得的偏导数再带入公式 (8) 即可求得定功率节点注入功率对所有支路功率的灵敏度。 $\lambda_{1,1} = \frac{\partial P_{l,1,2}}{\partial P_1} = 0.1574$ ， $\lambda_{1,2} = \frac{\partial P_{l,1,3}}{\partial P_1} = 0.1071$ ， $\lambda_{1,3} = \frac{\partial P_{l,2,3}}{\partial P_1} = -0.1071$ ，

$\lambda_{1,4} = \frac{\partial P_{l,2,5}}{\partial P_1} = 0.2975$ ， $\lambda_{1,5} = \frac{\partial P_{l,1,4}}{\partial P_1} = 0.7355$ ， $\lambda_{1,6} = \frac{\partial P_{l,4,5}}{\partial P_1} = 0$ 。同理可以求得其他节点对所有支路的灵敏度，结果如表 1 所示。

表 1 6 条支路的灵敏度

节点/支路编号	支路 1	支路 2	支路 3	支路 4	支路 5	支路 6
节点 1	0.1654	0.1126	-0.1126	0.2781	0.7219	0
节点 2	-0.2447	-0.1665	0.1665	0.5888	0.4112	0

节点 3	-0.0484	-0.5114	-0.4885	0.4404	0.5599	0
------	---------	---------	---------	--------	--------	---

下面按照步骤 S3 计算的影响。计算结果如下表所示。

下面按照步骤 S3 计算的影响。计算结果如下表所示。

节点/支路编号	支路 1	支路 2	支路 3	支路 4	支路 5	支路 6
定电压节点引起的潮流分布	-21.136	-14.398	14.402	-35.543	35.541	-74.301

再按照步骤 S4 和步骤 S5 即可计算获得定功率控制任意注入功率后的支路潮流分布。

- 5 假设节点 1 注入功率 260MW，节点 2 注入功率 340MW，节点 3 注入功率-450，按照本申请实施例计算得到的各支路潮流如下表所示。

表 3 定电压控制节点和定功率控制任意注入功率后的支路潮流分布

	支路 1	支路 2	支路 3	支路 4	支路 5	支路 6
本申请	-39.55	188.398	261.561	38.775	111.088	-74.301
迭代法	-39.3475	189.134	262.605	38.0196	110.215	-74.3012
偏差	0.0051201	-0.003907	-0.003991	0.0194816	0.0078586	-2.69E-06

对比说明，本算法计算精度是极好的。

实施例三、

- 10 基于同样的发明构思，本申请实施例还提供一种考虑直流控制方式的柔性直流电网潮流线性化计算系统，其结构框图如图 3 所示，包括：

分解模块 301，配置为依据控制方式将柔性直流电网潮流分解为：定电压控制节点潮流分布和定功率控制节点潮流分布；

第一计算模块 302，配置为计算定电压控制节点的潮流分布；

- 15 第二计算模块 303，配置为计算定功率控制节点的潮流分布；

第三计算模块 304，配置为叠加定电压控制节点的潮流分布和定功率控制节点的潮流分布计算最终的柔性直流电网线性化潮流结果。

所述系统还包括：柔性直流电网描述模块，配置为在将柔性直流电网

潮流按照控制方式分解之前，对柔性直流电网的节点编号，定功率控制节点编号在定电压控制节点编号之前；对柔性直流电网的支路编号，形成支路数据集，表示为[支路编号，首端节点，末端节点，支路电阻]；根据节点编号和支路数据集，形成节点导纳矩阵。

5 所述第一计算模块包括：

设置模块，配置为将定功率控制节点的所有注入功率设置为 0；

支路的潮流分布计算模块，配置为将所有将定电压控制节点的电压设置为已知的控制值，求解非线性方程组，计算所有支路的潮流分布。

所述第二计算模块包括：

10 灵敏度计算模块，配置为计算定功率控制节点注入功率对柔性直流电网中任意一条支路功率的灵敏度；

线性组合计算模块，配置为基于灵敏度将柔性直流电网支路功率表示为注入功率的线性组合。

在实际应用中，所述柔性直流电网潮流线性化计算系统中的各个模块
15 所实现的功能，均可由位于柔性直流电网潮流线性化计算系统中的中央处理器（CPU，Central Processing Unit）、或微处理器（MPU，Micro Processor Unit）、或数字信号处理器（DSP，Digital Signal Processor）、或现场可编程门阵列（FPGA，Field Programmable Gate Array）等实现。

本申请实施例的技术方案，解决了传统的基于注入功率的柔直电网的
20 潮流计算是一个非线性模型，当需要通过调整注入功率调节柔直电网支路潮流时，无法对其进行线性表达，分析存在困难。柔直电网的调度计划当考虑安全约束时，不实现柔直潮流的线性化表达则无法通过现有的线性化建模方式实现优化调度的问题。

本领域内的技术人员应明白，本申请的实施例可提供为方法、系统、
25 或计算机程序产品。因此，本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施

例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质（包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等）上实施的计算机程序产品的形式。

5 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备（系统）、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个
10 机器，使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中，使得存储在该计算机可读存
15 储器中的指令产生包括指令装置的制造品，该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上，使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的
20 处理，从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

 相应地，本发明实施例还提供一种计算机存储介质，其中存储有计算机程序，该计算机程序配置为执行本发明实施例的柔性直流电网潮流线性化计算方法。

25 最后应当说明的是：以上实施例仅用以说明本申请的技术方案而非对

其限制，尽管参照上述实施例对本申请进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员依然可以对本申请的具体实施方式进行修改或者等同替换，这些未脱离本申请精神和范围的任何修改或者等同替换，均在申请待批的本申请的权利要求保护范围之内。

5 工业实用性

本申请实施例的技术方案，解决了传统的基于注入功率的柔直电网的潮流计算是一个非线性模型，当需要通过调整注入功率调节柔直电网支路潮流时，无法对其进行线性表达，分析存在困难。柔直电网的调度计划当考虑安全约束时，不实现柔直潮流的线性化表达则无法通过现有的线性化建模方式实现优化调度的问题。

权利要求书

1、一种柔性直流电网潮流线性化计算方法，所述计算方法包括下述步骤：

将柔性直流电网潮流分解为：定电压控制节点潮流分布和定功率控制节点潮流分布；

将定功率控制节点的注入功率置零，将定电压控制节点置为控制值，计算定电压控制节点的潮流分布；

基于注入功率对柔性直流电网支路功率的灵敏度，计算定功率控制节点的潮流分布；

叠加定电压控制节点的潮流分布和定功率控制节点的潮流分布计算最终的柔性直流电网线性化潮流结果。

2、如权利要求 1 所述的柔性直流电网潮流线性化计算方法，其中，在将柔性直流电网潮流按照控制方式分解之前，所述方法还包括：

对柔性直流电网的节点编号，定功率控制节点编号在定电压控制节点编号之前；

对柔性直流电网的支路编号，形成支路数据集，表示为[支路编号，首端节点，末端节点，支路电阻]；

根据节点编号和支路数据集，形成节点导纳矩阵。

3、如权利要求 1 或 2 所述的柔性直流电网潮流线性化计算方法，其中，所述计算定电压控制节点的潮流分布，包括：

将定功率控制节点的所有注入功率设置为零；

将定电压控制节点的电压设置为已知的控制值，求解非线性方程组，得到所有支路定电压控制节点的潮流分布 $P_{i,v}$ 。

4、如权利要求 1 或 2 所述的柔性直流电网潮流线性化计算方法，其中，所述计算定功率控制节点的潮流分布，包括：

计算定功率控制节点注入功率对柔性直流电网支路功率的灵敏度；
基于灵敏度将柔性直流电网支路功率表示为注入功率的线性组合。

5 5、如权利要求 4 所述的柔性直流电网潮流线性化计算方法，其中，
所有定功率控制节点对柔性直流电网中任意一条支路的潮流灵敏度，根据下式计算得到：

$$\lambda_{i,l} = \frac{\partial P_{l,km}}{\partial P_i} = \frac{G_{k,m} \cdot (2 \frac{\partial V_k}{\partial V_i} - \frac{\partial V_m}{\partial V_i} - \frac{\partial V_k}{\partial V_i})}{2 \cdot G_{i,i} - \sum_{j \in I} G_{i,j} - \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}} = \frac{G_{k,m} \cdot (\frac{\partial V_k}{\partial V_i} - \frac{\partial V_m}{\partial V_i})}{G_{i,i} - \sum_{j \in I} \frac{\partial V_j}{\partial V_i} \cdot G_{i,j}}$$

将柔性直流电网支路功率 $P_{l,p}$ 表示为注入功率的线性组合，根据下式计算得到：

$$P_{l,p} = \sum_{i \in A} \lambda_{i,l} \cdot P_i$$

10 式中： $P_{l,km}$ 为节点 k、m 所在支路的注入功率， P_i 为节点 i 的注入功率， $\lambda_{i,l}$ 为节点 i 对支路 l 的灵敏度， $i \in A$ 表示所有定功率控制节点， V_i 为节点 i 的电压， V_k 为节点 k 的电压， V_m 为节点 m 的电压， G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导值，对应所述节点导纳矩阵的值取负， $j \in I$ ，表示与节点 i 直接相邻的节点， G_{ii} 为节点 i 的自导纳； $P_{l,p}$ 为定功率控制节点的潮流分布，
15 i、j、k、m 均为定功率控制节点。

6、如权利要求 2 或 5 中任一项所述的柔性直流电网潮流线性化计算方法，其中，当柔性直流电网各节点电压相等时，所述柔性直流电网线性化潮流结果，根据下式计算得到：

$$P_l = P_{l,v} + P_{l,p}$$

20 式中： $P_{l,v}$ 表示定电压控制节点的潮流分布， $P_{l,p}$ 为柔性直流电网支路功率， P_l 为柔性直流电网线性化潮流结果。

7、一种柔性直流电网潮流线性化计算系统，所述系统包括：

分解模块，配置为将柔性直流电网潮流分解为：定电压控制节点潮

流分布和定功率控制节点潮流分布;

第一计算模块,配置为计算定电压控制节点的潮流分布;

第二计算模块,配置为计算定功率控制节点的潮流分布;

第三计算模块,配置为叠加定电压控制节点的潮流分布和定功率控制节点的潮流分布计算最终的柔性直流电网线性化潮流结果。

8、如权利要求7所述的柔性直流电网潮流线性化计算系统,其中,所述第一计算模块包括:

设置模块,配置为将定功率控制节点的所有注入功率设置为0;

支路的潮流分布计算模块,配置为将所有将定电压控制节点的电压设置为已知的控制值,求解非线性方程组,计算所有支路的潮流分布 $P_{l,v}$ 。

9、如权利要求7所述的柔性直流电网潮流线性化计算系统,其中,所述系统还包括:柔性直流电网描述模块,配置为在将柔性直流电网潮流按照控制方式分解之前,对柔性直流电网的节点编号,定功率控制节点编号在定电压控制节点编号之前;对柔性直流电网的支路编号,形成支路数据集,表示为[支路编号,首端节点,末端节点,支路电阻];根据节点编号和支路数据集,形成节点导纳矩阵。

10、如权利要求7所述的柔性直流电网潮流线性化计算系统,其中,所述第二计算模块包括:

灵敏度计算模块,配置为计算定功率控制节点注入功率对柔性直流电网中任意一条支路功率的灵敏度;

线性组合计算模块,配置为基于灵敏度将柔性直流电网支路功率表示为注入功率的线性组合。

11、一种计算机存储介质,所述计算机存储介质中存储有计算机可执行指令,该计算机可执行指令配置为执行权利要求1-6任一项所述的柔性直流电网潮流线性化计算方法。

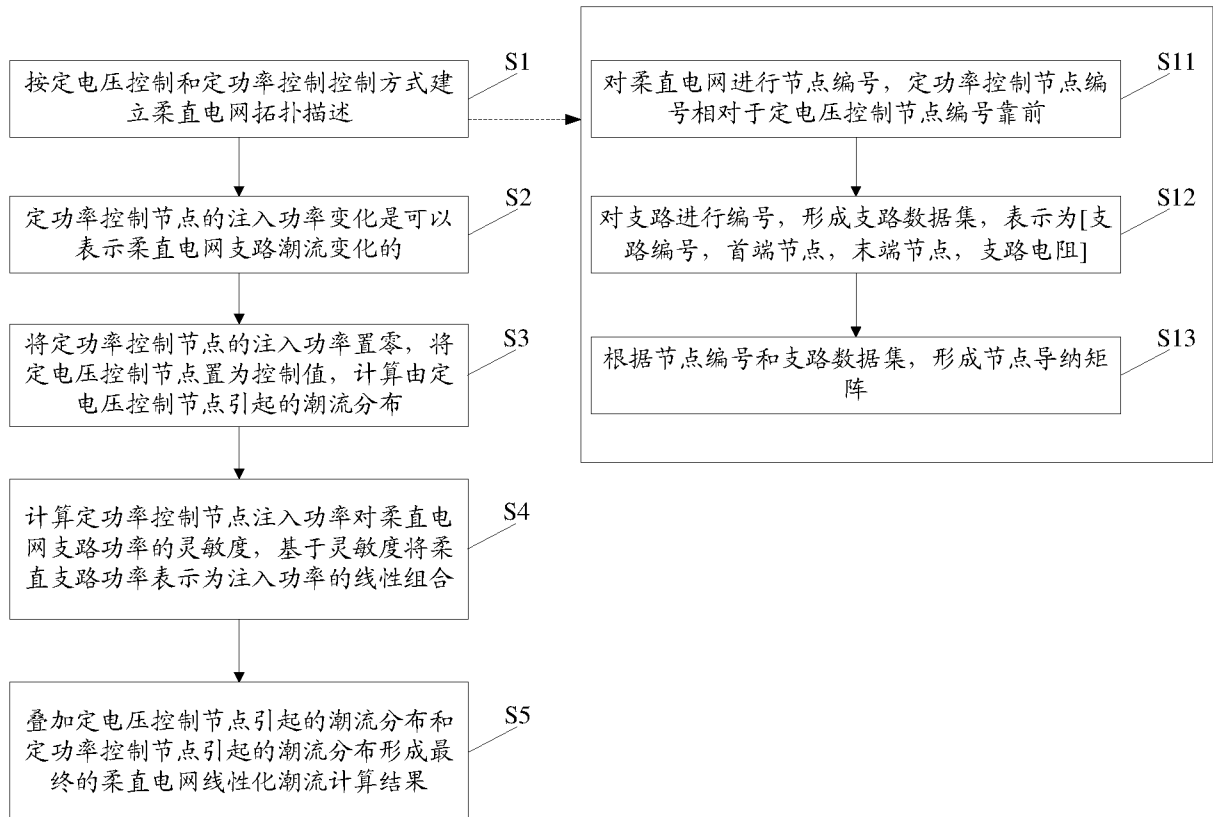


图 1

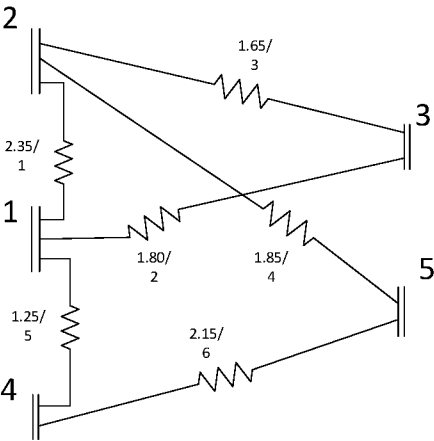


图 2



图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/071935

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/06 (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

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)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 柔性, 直流, 电网, 潮流, 线性, 定电压, 定功率, 节点, 叠加, 计算, flexible, DC, flow, calculat+, linear+, node?, distribut+, constant, voltage, power

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 106953328 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE et al.), 14 July 2017 (14.07.2017), description, particular embodiments, and figures 1-3	1-11
A	CN 105262077 A (ZHEJIANG UNIVERSITY et al.), 20 January 2016 (20.01.2016), description, paragraphs [0004]-[0024]	1-11
A	CN 102570485 A (CHONGQING ELECTRIC POWER CORPORATION et al.), 11 July 2012 (11.07.2012), entire document	1-11
A	CN 104167732 A (CHINA SOUTHERN POWER GRID CO., LTD. et al.), 26 November 2014 (26.11.2014), entire document	1-11
A	CN 105071372 A (TSINGHUA UNIVERSITY et al.), 18 November 2015 (18.11.2015), entire document	1-11
A	US 2013121312 A1 (RENESAS MOBILE CORPORATION), 16 May 2013 (16.05.2013), entire document	1-11

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“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
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“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
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“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
“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)	“&” document member of the same patent family
“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	

Date of the actual completion of the international search 29 March 2018	Date of mailing of the international search report 04 April 2018
Name and mailing address of the ISA 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 QI, Shaojie Telephone No. (86-10) 010-53961206

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2018/071935

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 106953328 A	14 July 2017	None	
CN 105262077 A	20 January 2016	CN 105262077 B	29 September 2017
CN 102570485 A	11 July 2012	CN 102570485 B	21 May 2014
CN 104167732 A	26 November 2014	CN 104167732 B	20 April 2016
CN 105071372 A	18 November 2015	CN 105071372 B	18 July 2017
US 2013121312 A1	16 May 2013	GB 2496458 A	15 May 2013
		GB 201119688 D0	28 December 2011

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/071935

A. 主题的分类 H02J 3/06 (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 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)) CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 柔性, 直流, 电网, 潮流, 线性, 定电压, 定功率, 节点, 叠加, 计算, flexible, DC, flow, calculat+, linear+, node?, distribut+, constant, voltage, power		
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
PX	CN 106953328 A (中国电力科学研究院 等) 2017年 7月 14日 (2017 - 07 - 14) 说明书具体实施方式、图1-3	1-11
A	CN 105262077 A (浙江大学 等) 2016年 1月 20日 (2016 - 01 - 20) 说明书第[0004]-[0024]段	1-11
A	CN 102570485 A (重庆市电力公司 等) 2012年 7月 11日 (2012 - 07 - 11) 全文	1-11
A	CN 104167732 A (中国南方电网有限责任公司 等) 2014年 11月 26日 (2014 - 11 - 26) 全文	1-11
A	CN 105071372 A (清华大学 等) 2015年 11月 18日 (2015 - 11 - 18) 全文	1-11
A	US 2013121312 A1 (RENESAS MOBILE CORPORATION) 2013年 5月 16日 (2013 - 05 - 16) 全文	1-11
☐ 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
2018年 3月 29日		2018年 4月 4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) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		祁少杰 电话号码 (86-10)010-53961206

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/071935

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	106953328	A	2017年 7月 14日	无	
CN	105262077	A	2016年 1月 20日	CN	105262077 B 2017年 9月 29日
CN	102570485	A	2012年 7月 11日	CN	102570485 B 2014年 5月 21日
CN	104167732	A	2014年 11月 26日	CN	104167732 B 2016年 4月 20日
CN	105071372	A	2015年 11月 18日	CN	105071372 B 2017年 7月 18日
US	2013121312	A1	2013年 5月 16日	GB	2496458 A 2013年 5月 15日
				GB	201119688 D0 2011年 12月 28日