

(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
2014 年 9 月 25 日 (25.09.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/146461 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 1/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/088876
- (22) 国际申请日: 2013 年 12 月 9 日 (09.12.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201310091059.1 2013 年 3 月 21 日 (21.03.2013) 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)。 国网智能电网研究院 (STATE GRID SMART GRID RESEARCH INSTITUTE) [—/CN]; 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 中电普瑞电力工程有限公司 (CHINA-EPRI ELECTRIC POWER ENGINEERING CO.,LTD) [CN/CN]; 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。
- (72) 发明人: 汤广福 (TANG, Guangfu); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 刘杰 (LIU, Jie); 中国北京市昌平区小汤山

镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 魏晓光 (WEI, Xiaoguang); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 曹均正 (CAO, Junzheng); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 郭焕 (GUO, Huan); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。

(74) 代理人: 北京安博达知识产权代理有限公司 (AM-BOYNA INTELLECTUAL PROPERTY AGENT CO., LTD.); 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华泰大厦 B215, 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, LT, 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,

[见续页]

(54) Title: IMPLEMENTATION METHOD FOR FORWARD DIRECTION SLOPE CONTROL POLICY OF DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEM

(54) 发明名称: 一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法

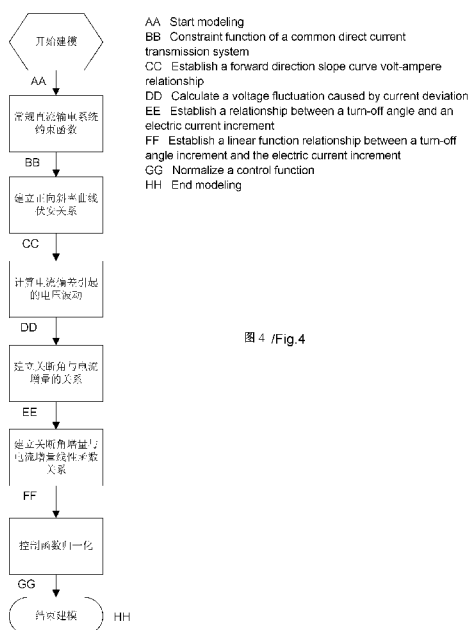


图 4 /Fig. 4

(57) Abstract: An implementation method for a forward direction slope control policy of a direct current transmission system. A direct current transmission system used in the implementation method comprises a rectification side power supply, a thyristor valve, a smoothing reactor (Ld), a circuit resistor (R), a circuit inductor (L), a circuit ground capacitor (C), an equivalent commutating resistor (dxr) and an equivalent commutating resistor (dxi), the thyristor valve, the smoothing reactor (Ld), the circuit resistor (R) and the circuit inductor (L) being serially connected sequentially. The method comprises the following steps: A, determining a constraint function of a direct current transmission system; B, establishing a forward direction slope curve volt-ampere characteristic; C, calculating a voltage fluctuation caused by current deviation; D, establishing a relationship between a turn-off angle and an electric current increment; E, establishing a linear function relationship of a turn-off angle increment and the electric current increment; and F, normalizing the constraint function. By means of the method, the problem is solved that a stable operation point does not exist between current regulators at two ends and thus a direct current oscillates in a reciprocating mode between two definite values, so that the direct current transmission system can operate stably, thereby avoiding the impact of power fluctuation on a power grid.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2014/146461 A1



RW, SD, SL, 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))。

一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，该方法采用的直流输电系统包括整流侧电源、依次串联的晶闸管阀、平波电抗器（ L_d ）、线路电阻（ R ）和线路电感（ L ）、线路对地电容（ C ）、比换相压降（ dx_r ）和（ dx_i ）；该方法包括以下步骤：A.确定直流输电系统的约束函数；B.建立正向斜率曲线伏安特性；C.计算电流偏差引起的电压波动；D.建立关断角与电流增量的关系；E.建立关断角增量与电流增量的线性函数关系；F.对约束函数进行归一化。该方法解决了两端电流调节器之间没有稳定的运行点，直流电流将在两个定值之间来回振荡的问题，使得直流输电系统可以稳定运行，避免功率波动对电网的冲击。

一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法

技术领域

本发明涉及直流输电领域，具体涉及一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法。

背景技术

直流输电系统等效电路如附图 1 所示，实际工程中，往往采用整流侧平波电抗器出口处电压电流表示系统伏安特性。额定工况下，整流侧运行于定电流控制，逆变侧运行于定最小关断角控制，系统额定工作点位 N 点。由于某种原因，整流侧电压不断下降，整流侧运行于定最小触发角控制，逆变侧运行于定电流控制，在接近于逆变器的定最小关断角控制和定电流控制曲线的过渡部分的某些电压水平，定最小触发角控制与逆变侧定电流和定最小关断角控制均有交点，控制方式的选择将发生混淆如图 2 所示。此时，两端电流调节器之间没有稳定的运行点，直流电流将在两个定值之间来回振荡。为了避免这一问题，经常在逆变器的定电流控制和定之间引入一个斜率为正的特性，如图 3 所示。

发明内容

针对现有技术的不足，本发明的目的是提供一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，本发明提出了将正向斜率控制嵌套于系统中必须设置的定最小关断角控制之中，简化了控制策略的结构。

一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，所述方法采用的直流输电系统包括整流侧电源、依次串联的晶闸管阀、平波电抗器 L_d 、线路电阻 R 和线路电感 L ，线路对地电容 C ，比换相压降 d_{xr} 和 d_{xi} ；

其改进之处在于，所述方法包括下述步骤：

- A、确定直流输电系统的约束函数；
- B、建立正向斜率曲线伏安特性；
- C、计算电流偏差引起的电压波动；
- D、建立关断角与电流增量的关系；
- E、建立关断角增量与电流增量的线性函数关系；
- F、对约束函数进行归一化。

优选的，所述步骤 A 中，直流输电系统的约束函数包括整流侧平波电抗器出口处伏安特性，用下述表达式表示：

$$U_d = U_{d0r} \cos \alpha - I_d \cdot d_{xr} \quad (1);$$

所述整流侧平波电抗器出口处伏安特性用逆变侧参数表示为:

$$U_d = U_{d0i} \cos \gamma - I_d (d_{xi} - R) \quad (2);$$

其中: U_d 和 I_d 分别表示整流侧平波电抗器出口处电压和电流; α 表示整流侧触发角; U_{d0r} 表示整流侧理想空载电压; d_{xr} 表示整流侧比换相压降; γ 为直流输电系统关断角; U_{d0i} 表示逆变侧理想空载直流电压; d_{xi} 表示逆变侧比换相压降; U_d 随 I_d 增大线性减小, 线性变换的斜率由 d_{xr} 和 d_{xi} 决定。

优选的, 所述步骤 B 中, 所述正向斜率控制用于连接逆变侧定电流控制和定关断角控制, 与定关断角控制的交点为额定工作点, 记作 $N(I_{dN}, U_{dN})$, 与定电流控制的交点记作 $N_0(I_{d0}, U_{d0})$, N 和 N_0 在同一直线上, 则线上任意一点 (I_d, U_d) 表示为:

$$\frac{U_{dN} - U_d}{I_{dN} - I_d} = \frac{U_d - U_{d0}}{I_d - I_{d0}} \quad (3);$$

其中: U_{dN} 和 I_{dN} 分别表示与定关断角控制的额定电压工作点和额定电流工作点; U_{d0} 和 I_{d0} 分别表示与定电流控制的额定电压工作点和额定电流工作点;

U_d 和 U_{d0} 之间, 以及 I_d 和 I_{d0} 之间往往存在的比例关系为:

$$\begin{aligned} I_{d0} &= k I_{dN} \\ U_{d0} &= \xi U_{dN} \end{aligned} \quad (4);$$

其中: k 和 ξ 均为小于 1 的比例系数; 由表达式③和表达式组④得:

$$U_d = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}} \cdot I_d + \left(1 - \frac{1-\xi}{1-k}\right) \cdot U_{dN} \quad (5);$$

简写为:

$$U_d = K \cdot I_d + B \quad (6);$$

$$\text{其中: } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}; \quad B = \left(1 - \frac{1-\xi}{1-k}\right) \cdot U_{dN}。$$

优选的, 所述步骤 C 中, 当直流输电系统处于正向斜率控制时, 若直流输电系统发生波动, 电流增加 ΔI_d , 则整流侧平波电抗器出口处电压 U'_d , 此时的直流系统的关断角记作 γ' :

$$U_d' = U_{d0i} \cos \gamma' - (I_d + \Delta I_d) \cdot (d_{xi} - R) \quad (7);$$

由⑥式得 U_d' 为

$$U_d' = U_d + K \cdot \Delta I_d \quad (8);$$

将⑧式代入⑦式得:

$$U_d' = U_{d0i} \cos \gamma - I_d (d_{xi} - R) + K \cdot \Delta I_d \quad (9);$$

$$\text{其中: } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}。$$

优选的, 所述步骤 D 中, 所述关断角与电流增量的关系用下述表达式表示:

$$U_{d0i} (\cos \gamma' - \cos \gamma) = \Delta I_d \cdot (d_{xi} - R + K) \quad (10);$$

其中: γ' 表示直流输电系统发生波动时的关断角。

优选的, 所述步骤 E 中, 在额定运行点附近将余弦函数进行泰勒展开, 关断角增量与电流增量的线性函数关系表示为:

$$\cos \gamma = \cos \gamma_0 - \sin \gamma_0 \cdot (\gamma - \gamma_0) + R_m(\gamma) \quad (11);$$

$R_m(\gamma)$ 称为拉格朗日余项;

$$\begin{aligned} U_{d0i} \cdot (\cos \gamma' - \cos \gamma) &\approx -U_{d0i} \cdot \sin \gamma_0 \cdot (\gamma' - \gamma) \\ &= \Delta I_d \cdot (d_{xi} - R + K) \end{aligned} \quad (12);$$

$$\text{其中: } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}。$$

优选的, 所述步骤 F 中, 在直流输电控制系统中, 采用额定直流电流 I_d 和逆变侧理想空载直流电压 U_{d0i} 的标幺值作为直流输电系统控制对象, 将约束函数整理得电流变化标幺值与关断角偏差之间的函数关系:

$$\begin{aligned} \Delta \gamma &= \lambda \cdot \Delta I_{d*} \\ \lambda &= \frac{(d_{xi} - R)(1-k)I_{dN} + (1-\xi)U_{dN}}{U_{d0i} \cdot \sin \gamma_0 \cdot (1-k)} \end{aligned} \quad (13);$$

其中: $\Delta \gamma$ 表示关断角增量; R 表示线路电阻; γ_0 表示额定关断角;

电流增量引起的直流输电系统增加转化为关断角指令的增加，将正向斜率控制嵌套于定关断角控制之中。

与现有技术比，本发明达到的有益效果是：

本发明提供了一种正向斜率控制的实现方法，解决了两端电流调节器之间没有稳定的运行点，直流电流将在两个定值之间来回振荡的问题，使得直流输电系统可以稳定运行，避免功率波动对电网的冲击。

本发明提出了将正向斜率控制嵌套于系统中必须设置的定最小关断角控制之中，简化了控制策略的结构。

附图说明

图 1 是直流输电系统等效电路；

图 2 是直流系统中控制方式的选择发生混淆的示意图；

图 3 是逆变器的定电流控制和定关断角之间引入一个斜率为正的特性示意图；

图 4 是本发明提供的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法的流程图。

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。

本发明提供了一种常规直流输电系统用正向斜率控制策略实现方法。该方法从常规直流系统约束函数出发，分析了系统运行电压电流在伏安关系曲线上呈现为正向斜率直线的实现原理，建立了电流偏差与逆变侧关断角增量之间的函数关系，提出了将正向斜率控制嵌套于系统中必须设置的定最小关断角控制之中。

本发明提供的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法采用的直流输电系统包括整流侧电源、依次串联的晶闸管阀、平波电抗器 L_d 、线路电阻 R 和线路电感 L ，线路对地电容 C ，比换相压降 d_{xr} 和 d_{xi} ；本发明提供的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法的流程图如图 4 所示，具体包括下述步骤：

A、确定直流输电系统的约束函数；

步骤 A 中，直流输电系统的约束函数包括整流侧平波电抗器出口处伏安特性，用下述表达式表示：

$$U_d = U_{d0r} \cos \alpha - I_d \cdot d_{xr} \quad (1);$$

所述整流侧平波电抗器出口处伏安特性用逆变侧参数表示为：

$$U_d = U_{d0i} \cos \gamma - I_d (d_{xi} - R) \quad (2);$$

其中: U_d 和 I_d 分别表示整流侧平波电抗器出口处电压和电流; α 表示整流侧触发角; U_{d0r} 表示整流侧理想空载电压; d_{xr} 表示整流侧比换相压降; γ 为直流输电系统关断角; U_{d0i} 表示逆变侧理想空载直流电压; d_{xi} 表示逆变侧比换相压降; U_d 随 I_d 增大线性减小, 线性变换的斜率由 d_{xr} 和 d_{xi} 决定。

B、建立正向斜率曲线伏安特性;

步骤 B 中, 所述正向斜率控制用于连接逆变侧定电流控制和定关断角控制, 与定关断角控制的交点为额定工作点, 记作 $N(I_{dN}, U_{dN})$, 与定电流控制的交点记作 $N_0(I_{d0}, U_{d0})$, N 和 N_0 在同一直线上, 则线上任意一点 (I_d, U_d) 表示为:

$$\frac{U_{dN} - U_d}{I_{dN} - I_d} = \frac{U_d - U_{d0}}{I_d - I_{d0}} \quad (3);$$

其中: U_{dN} 和 I_{dN} 分别表示与定关断角控制的额定电压工作点和额定电流工作点; U_{d0} 和 I_{d0} 分别表示与定电流控制的额定电压工作点和额定电流工作点;

U_d 和 U_{d0} 之间, 以及 I_d 和 I_{d0} 之间往往存在的比例关系为:

$$\begin{aligned} I_{d0} &= k I_{dN} \\ U_{d0} &= \xi U_{dN} \end{aligned} \quad (4);$$

其中: k 和 ξ 均为小于 1 的比例系数; 由表达式③和表达式组④得:

$$U_d = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}} \cdot I_d + \left(1 - \frac{1-\xi}{1-k}\right) \cdot U_{dN} \quad (5);$$

简写为:

$$U_d = K \cdot I_d + B \quad (6);$$

其中: $K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}$; $B = \left(1 - \frac{1-\xi}{1-k}\right) \cdot U_{dN}$ 。

C、计算电流偏差引起的电压波动;

步骤 C 中, 当直流输电系统处于正向斜率控制时, 若直流输电系统发生波动, 电流增加 ΔI_d , 则整流侧平波电抗器出口处电压 U'_d , 此时的关断角记作 γ' :

$$U'_d = U_{d0i} \cos \gamma' - (I_d + \Delta I_d) \cdot (d_{xi} - R) \quad (7);$$

由⑥式得 U_d' 为

$$U_d' = U_d + K \cdot \Delta I_d \quad (8);$$

将⑧式代入⑦式得:

$$U_{d0i}' = U_{d0i} \cos \gamma - I_d (d_{xi} - R) + K \cdot \Delta I_d \quad (9);$$

$$\text{其中: } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}。$$

D、建立关断角与电流增量的关系;

所述关断角与电流增量的关系用下述表达式表示:

$$U_{d0i} (\cos \gamma' - \cos \gamma) = \Delta I_d \cdot (d_{xi} - R + K) \quad (10);$$

其中: γ' 表示关断角。

E、建立关断角增量与电流增量的线性函数关系;

步骤 E 中, 在额定运行点附近将余弦函数进行泰勒展开, 关断角增量与电流增量的线性函数关系表示为:

$$\cos \gamma = \cos \gamma_0 - \sin \gamma_0 \cdot (\gamma - \gamma_0) + R_m(\gamma) \quad (11);$$

$R_m(\gamma)$ 称为拉格朗日余项;

$$\begin{aligned} U_{d0i} \cdot (\cos \gamma' - \cos \gamma) &\approx -U_{d0i} \cdot \sin \gamma_0 \cdot (\gamma' - \gamma) \\ &= \Delta I_d \cdot (d_{xi} - R + K) \end{aligned} \quad (12);$$

$$\text{其中: } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}。$$

F、对约束函数进行归一化。

步骤 F 中, 在直流输电控制系统中, 采用额定直流电流 I_d 和逆变侧理想空载直流电压 U_{d0i} 的标么值作为直流输电系统控制对象, 将约束函数整理得电流变化标么值与关断角偏差之间的函数关系:

$$\begin{aligned} \Delta \gamma &= \lambda \cdot \Delta I_{d*} \\ \lambda &= \frac{(d_{xi} - R)(1-k)I_{dN} + (1-\xi)U_{dN}}{U_{d0i} \cdot \sin \gamma_0 \cdot (1-k)} \end{aligned} \quad (13);$$

其中： $\Delta\gamma$ 表示关断角增量； R 表示线路电阻； γ_0 表示额定关断角；

电流增量引起的直流输电系统增加转化为关断角指令的增加，将正向斜率控制嵌套于定关断角控制之中。

本发明提供的正向斜率控制的实现方法，解决了两端电流调节器之间没有稳定的运行点，直流电流将在两个定值之间来回振荡的问题，使得直流输电系统可以稳定运行，避免功率波动对电网的冲击。

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、一种直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，所述方法采用的直流输电系统包括整流侧电源、依次串联的晶闸管阀、平波电抗器 L_d 、线路电阻 R 和线路电感 L ，线路对地电容 C ，比换相压降 d_{xr} 和 d_{xi} ；

其特征在于，所述方法包括下述步骤：

- A、确定直流输电系统的约束函数；
- B、建立正向斜率曲线伏安特性；
- C、计算电流偏差引起的电压波动；
- D、建立关断角与电流增量的关系；
- E、建立关断角增量与电流增量的线性函数关系；
- F、对约束函数进行归一化。

2、如权利要求 1 所述的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，其特征在于，所述步骤 A 中，直流输电系统的约束函数包括整流侧平波电抗器出口处伏安特性，用下述表达式表示：

$$U_d = U_{d0r} \cos \alpha - I_d \cdot d_{xr} \quad (1);$$

所述整流侧平波电抗器出口处伏安特性用逆变侧参数表示为：

$$U_d = U_{d0i} \cos \gamma - I_d (d_{xi} - R) \quad (2);$$

其中： U_d 和 I_d 分别表示整流侧平波电抗器出口处电压和电流； α 表示整流侧触发角； U_{d0r} 表示整流侧理想空载电压； d_{xr} 表示整流侧比换相压降； γ 为直流输电系统关断角； U_{d0i} 表示逆变侧理想空载直流电压； d_{xi} 表示逆变侧比换相压降； U_d 随 I_d 增大线性减小，线性变换的斜率由 d_{xr} 和 d_{xi} 决定。

3、如权利要求 1 所述的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，其特征在于，所述步骤 B 中，所述正向斜率控制用于连接逆变侧定电流控制和定关断角控制，与定关断角控制的交点为额定工作点，记作 $N(I_{dN}, U_{dN})$ ，与定电流控制的交点记作 $N_0(I_{d0}, U_{d0})$ ， N 和 N_0 在同一直线上，则线上任意一点 (I_d, U_d) 表示为：

$$\frac{U_{dN} - U_d}{I_{dN} - I_d} = \frac{U_d - U_{d0}}{I_d - I_{d0}} \quad (3);$$

其中： U_{dN} 和 I_{dN} 分别表示与定关断角控制的额定电压工作点和额定电流工作点； U_{d0} 和 I_{d0} 分别表示与定电流控制的额定电压工作点和额定电流工作点；

U_d 和 U_{d0} 之间，以及 I_d 和 I_{d0} 之间往往存在的比例关系为：

$$\begin{aligned} I_{d0} &= kI_{dN} \\ U_{d0} &= \xi U_{dN} \end{aligned} \quad (4);$$

其中： k 和 ξ 均为小于1的比例系数；由表达式③和表达式组④得：

$$U_d = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}} \cdot I_d + \left(1 - \frac{1-\xi}{1-k}\right) \cdot U_{dN} \quad (5);$$

简写为：

$$U_d = K \cdot I_d + B \quad (6);$$

$$\text{其中： } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}; \quad B = \left(1 - \frac{1-\xi}{1-k}\right) \cdot U_{dN}。$$

4、如权利要求1所述的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，其特征在于，所述步骤C中，当直流输电系统处于正向斜率控制时，若直流输电系统发生波动，电流增加 ΔI_d ，则整流侧平波电抗器出口处电压 U_d' ，此时的直流输电系统关断角记作 γ' ：

$$U_d' = U_{d0i} \cos \gamma' - (I_d + \Delta I_d) \cdot (d_{xi} - R) \quad (7);$$

由⑥式得 U_d' 为

$$U_d' = U_d + K \cdot \Delta I_d \quad (8);$$

将⑧式代入⑦式得：

$$U_d' = U_{d0i} \cos \gamma' - I_d (d_{xi} - R) + K \cdot \Delta I_d \quad (9);$$

$$\text{其中： } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}。$$

5、如权利要求1所述的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，其特征在于，所述步骤D中，所述关断角与电流增量的关系用下述表达式表示：

$$U_{d0i} (\cos \gamma' - \cos \gamma) = \Delta I_d \cdot (d_{xi} - R + K) \quad (10);$$

其中： γ' 表示直流输电系统发生波动时的关断角。

6、如权利要求 1 所述的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，其特征在于，所述步骤 E 中，在额定运行点附近将余弦函数进行泰勒展开，关断角增量与电流增量的线性函数关系表示为：

$$\cos \gamma = \cos \gamma_0 - \sin \gamma_0 \cdot (\gamma - \gamma_0) + R_m(\gamma) \quad (11);$$

$R_m(\gamma)$ 称为拉格朗日余项；

$$\begin{aligned} U_{d0i} \cdot (\cos \gamma' - \cos \gamma) &\approx -U_{d0i} \cdot \sin \gamma_0 \cdot (\gamma' - \gamma) \\ &= \Delta I_d \cdot (d_{xi} - R + K) \end{aligned} \quad (12);$$

$$\text{其中： } K = \frac{1-\xi}{1-k} \cdot \frac{U_{dN}}{I_{dN}}。$$

7、如权利要求 1 所述的直流输电系统正向斜率控制策略的实现方法，其特征在于，所述步骤 F 中，在直流输电控制系统中，采用额定直流电流 I_d 和逆变侧理想空载直流电压 U_{d0i} 的标么值作为直流输电系统控制对象，将约束函数整理得电流变化标么值与关断角偏差之间的函数关系：

$$\begin{aligned} \Delta \gamma &= \lambda \cdot \Delta I_{d*} \\ \lambda &= \frac{(d_{xi} - R)(1-k)I_{dN} + (1-\xi)U_{dN}}{U_{d0i} \cdot \sin \gamma_0 \cdot (1-k)} \end{aligned} \quad (13);$$

其中： $\Delta \gamma$ 表示关断角增量； R 表示线路电阻； γ_0 表示额定关断角；

电流增量引起的直流输电系统增加转化为关断角指令的增加，将正向斜率控制嵌套于定关断角控制之中。

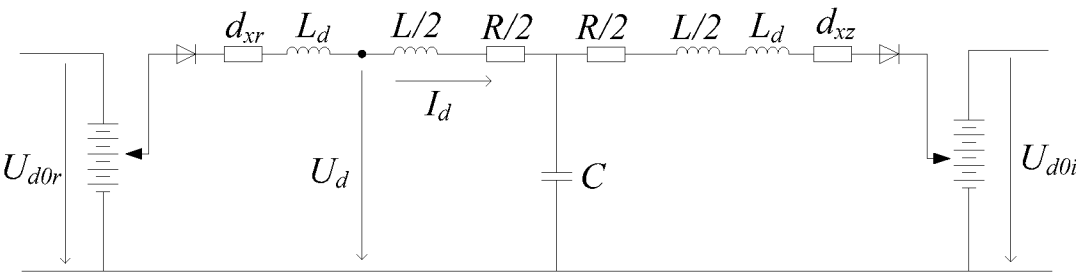


图 1

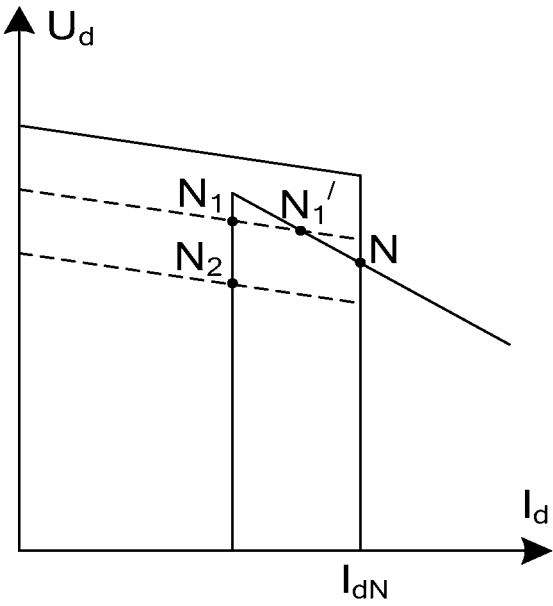


图 2

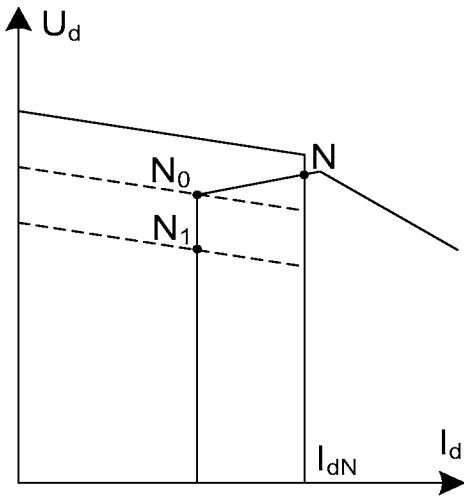


图 3

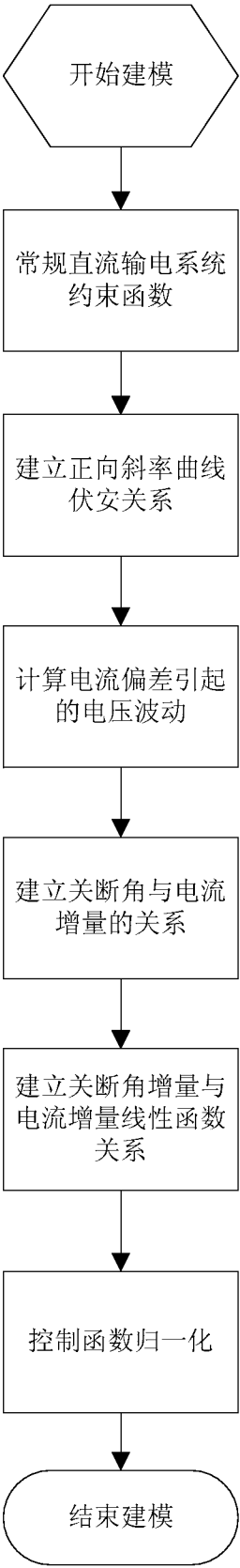


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/088876

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 1/00 (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)

IPC: 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, CNKI, WPI, EPODOC: direct current, electricity transmission, extinction angle, turn-off angle, positive, stable, invert, constraint, direct, current, power, arc, extinguish, angle, control, trigger, slope

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, X	CN 103259257 A (SMART GRID RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.), 21 August 2013 (21.08.2013), see the whole description, and claims 1-7	1-7
Y	CN 102496924 A (SHANDONG UNIVERSITY), 13 June 2012 (13.06.2012), see description, paragraphs 21-61, and figures 1-5	1
Y	DENG, Guangjing et al., Study on Modeling and Control Strategy of CIGRE HVDC Benchmark System, JIANGSU ELECTRICAL ENGINEERING, January 2009, volume 28, number 1, pages 32-34, figures 1-13, ISSN 1009-0665	1
A	CN 1881772 A (XJ GROUP CORPORATION et al.), 20 December 2006 (20.12.2006), see the whole description	1-7
A	CN 101917019 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE), 15 December 2010 (15.12.2010), see the whole description	1-7

☐ 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 07 March 2014 (07.03.2014)	Date of mailing of the international search report 20 March 2014 (20.03.2014)
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 FENG, Shangming Telephone No.: (86-10) 62089409

International application No.
PCT/CN2013/088876

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

A. 主题的分类		
H02J 1/00 (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)		
IPC: 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, CNKI, WPI, EPODOC 直流, 输电, 熄弧角, 关断角, 斜率, 正, 稳定, 逆变, 约束, direct, current, power, arc, extinguish, angle, control, trigger, slope		
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
P,X	CN 103259257 A (国网智能电网研究院等) 21.8 月 2013 (21.08.2013) 见说明书全文, 权利要求 1-7	1-7
Y	CN 102496924 A (山东大学) 13.6月 2012 (13.06.2012) 参见说明书第21-61段, 图1-5	1
Y	邓广静等. CIGRE直流输电标准模型的建模及控制策略仿真研究. 江苏电机工程 1 月2009, 第28卷, 第1期, 第32页-第34页, 图1-13, ISSN 1009-0665	1
A	CN 1881772 A (许继集团有限公司等) 20.12 月 2006 (20.12.2006)见说明书全文	1-7
A	CN 101917019 A (中国电力科学研究院) 15.12月 2010 (15.12.2010)见说明书全文	1-7
☐ 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 07.3 月 2014 (07.03.2014)		国际检索报告邮寄日期 20.3 月 2014 (20.03.2014)
ISA/CN 的名称和邮寄地址: 中华人民共和国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088 传真号: (86-10)62019451		授权官员 冯尚明 电话号码: (86-10) 62089409

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2013/088876

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN 103259257 A	21.08.2013	无	
CN 102496924 A	13.06.2012	无	
CN 1881772 A	20.12.2006	CN 1881772 B	28.04.2010
CN 101917019 A	15.12.2010	无	