



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114256830 A

(43) 申请公布日 2022. 03. 29

(21) 申请号 202111533145.4

(22) 申请日 2021.12.15

(71) 申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72) 发明人 朱琳 赵学深 郭力 李霞林

卢浩 王成山 王智 李鹏飞

张可心

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 程毓英

(51) Int. Cl.

H02J 1/00 (2006.01)

H02J 1/10 (2006.01)

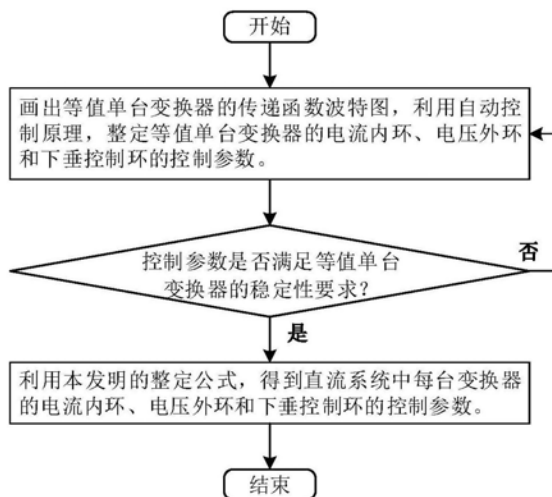
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法,包括下列步骤:将直流系统中多台变换器的输出滤波电感电流状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的输出滤波电感电流状态变量;将直流系统中多台变换器的电流控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量;将直流系统中多台变换器的电压控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量;将直流系统中多台变换器的下垂控制环,等值变换为一个等值单台变换器的下垂控制环,将基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统,建模为一个等值单台变换器;控制参数整定。



1. 一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法,包括下列步骤:

步骤1:针对基于电压电流双环控制的直流系统,将直流系统中多台变换器的输出滤波电感电流状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的输出滤波电感电流状态变量,方法如下:

设第 $y$ 台变换器的输出滤波电感电流为 $I_y, y=1, 2, \dots, n, n$ 为直流系统中所有变换器的总台数,将所有变换器的输出滤波电感电流相互累加,该累加和等值为一个等值单台变换器的输出滤波电感电流 $I$ ,将 $I_y, y=1, 2, \dots, n,$ 和 $I$ 作为状态变量;

步骤2:将直流系统中多台变换器的电流控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量,方法如下:

设第 $y$ 台变换器的电流控制积分环节状态变量为 $\int (I_{ry} - I_y) dt$ ,设等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量为 $\int (I_r - I) dt$ ,基于步骤1所得到的输出滤波电感电流状态变量等值变换关系,进一步得到 $\int (I_{ry} - I_y) dt$ 和 $\int (I_r - I) dt$ 之间的等值变换关系,如下式所示

$$\frac{k_{pi}(I_r - I) + k_{ii} \int (I_r - I) dt}{L_r} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{piy}(I_{ry} - I_y) + k_{iiy} \int (I_{ry} - I_y) dt}{L_{fy}} \right)$$

其中, $k_{piy}$ 和 $k_{iiy}$ 分别为第 $y$ 台变换器电流内环的比例系数和积分系数, $I_{ry}$ 为第 $y$ 台变换器的输出滤波电感电流参考值, $k_{pi}$ 和 $k_{ii}$ 分别为等值单台变换器电流内环的比例系数和积分系数, $I_r$ 为等值单台变换器的输出滤波电感电流参考值, $L_{fy}$ 和 $L_f$ 分别为第 $y$ 台变换器和等值单台变换器的输出滤波电感, $\int, d$ 和 $t$ 分别为积分符号、微分算子和时间;

步骤3:将直流系统中多台变换器的电压控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量,方法如下:

设第 $y$ 台变换器的电压控制积分环节状态变量为 $\int (U_{refy} - U) dt$ ,设等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量为 $\int (U_{ref} - U) dt$ ,由于各台变换器均通过电压外环得到 $I_{ry}$ ,等值单台变换器通过电压外环得到 $I_r$ ,基于步骤2所得到的电流控制积分环节状态变量等值变换关系,进一步获得 $\int (U_{refy} - U) dt$ 和 $\int (U_{ref} - U) dt$ 之间的等值变换关系,如下式所示:

$$\frac{k_{iu}}{L_f} \left\{ k_{pu}(U_{ref} - U) + k_{iu} \int (U_{ref} - U) dt - I \right\} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{iuy}}{L_{fy}} \left\{ k_{puy}(U_{refy} - U) + k_{iuy} \int (U_{refy} - U) dt - I_y \right\} \right)$$

其中, $U_{refy}$ 和 $U_{ref}$ 分别为第 $y$ 台变换器和等值单台变换器的输出电压参考值, $U$ 为直流系统的直流母线电压, $k_{puy}$ 和 $k_{iuy}$ 分别为第 $y$ 台变换器电压外环的比例系数和积分系数, $k_{pu}$ 和 $k_{iu}$ 分别为等值单台变换器电压外环的比例系数和积分系数;

步骤4:将直流系统中多台变换器的下垂控制环,等值变换为一个等值单台变换器的下垂控制环,将基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统,建模为一个等值单台变换器;

步骤5:整定得到满足稳定性要求的等值单台变换器的电流内环、电压外环和下垂控制环的控制参数;

步骤6:基于步骤5整定得到的等值单台变换器的电流内环控制参数,整定直流系统中每台变换器的电流内环控制参数,通过如下公式获得直流系统中每台变换器的电流内环控制参数:

$$\begin{cases} k_{piy} = \frac{k_{pi} L_{fy}}{L_f} \\ k_{iiy} = \frac{k_{ii} L_{fy}}{L_f} \end{cases}$$

步骤7:基于步骤5整定得到的等值单台变换器的电压外环控制参数,整定直流系统中每台变换器的电压外环控制参数,通过如下公式获得直流系统中每台变换器的电压外环控制参数:

$$\begin{cases} k_{piy} = k_{pu} p_y \\ k_{iiy} = k_{iu} p_y \end{cases}$$

式中, $p_y$ 为第 $y$ 台变换器的电流均分系数;

步骤8:基于步骤5整定得到的等值单台变换器下垂控制环的控制参数,整定直流系统中每台变换器下垂控制环的控制参数,通过如下公式获得直流系统中每台变换器的下垂系数:

$$k_{dy} = \frac{k_d}{p_y}$$

式中, $k_d$ 为等值单台变换器的下垂系数, $k_{dy}$ 为第 $y$ 台变换器的下垂系数。

## 基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于直流系统控制参数整定领域,特别涉及一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法。

### 背景技术

[0002] 单台变换器在其独立运行时的控制参数整定方法已经非常成熟,所以由单台变换器构成的直流系统通常不会出现稳定性问题。但当多台变换器在同一直流母线上并联运行时,各台变换器之间就存在着相互耦合作用,再加上直流系统中存在着大量的具有负阻特性的恒功率负荷,这就导致了多台变换器并联直流系统可能会出现稳定性问题。针对基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统,附加新型阻尼控制器等方法虽然能够解决直流系统出现的稳定性问题,但该类附加新型阻尼控制器的通用性还有待进一步验证。所以,合理整定直流系统的电压电流双环控制的控制参数,是解决多台变换器并联直流系统稳定性问题的有效解决方案。当直流系统中某台变换器的控制参数发生变化时,由于各台变换器之间存在着相互耦合作用,也就会影响其他变换器的控制动态特性,进而影响整个直流系统的动态稳定性。所以,基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统的控制参数整定,要比单台变换器直流系统复杂的多。

[0003] 综上所述,为了显著减小基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统的控制参数整定复杂度,充分发挥直流系统的技术优势,需要一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法。

### 发明内容

[0004] 为了解决基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统的控制参数整定难题,由于多台变换器并联直流系统可以由一台等值单台变换器进行表示,本发明提出一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法,建立了等值单台变换器和直流系统中每台变换器之间的控制参数整定表达式。技术方案如下:

[0005] 一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法,包括下列步骤:

[0006] 步骤1:针对基于电压电流双环控制的直流系统,将直流系统中多台变换器的输出滤波电感电流状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的输出滤波电感电流状态变量,方法如下:

[0007] 设第 $y$ 台变换器的输出滤波电感电流为 $I_y, y=1, 2, \dots, n, n$ 为直流系统中所有变换器的总台数,将所有变换器的输出滤波电感电流相互累加,该累加和等值为一个等值单台变换器的输出滤波电感电流 $I$ ,将 $I_y, y=1, 2, \dots, n$ ,和 $I$ 作为状态变量;

[0008] 步骤2:将直流系统中多台变换器的电流控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量,方法如下:

[0009] 设第 $y$ 台变换器的电流控制积分环节状态变量为 $\int (I_{ry} - I_y) dt$ ,设等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量为 $\int (I_r - I) dt$ ,基于步骤1所得到的输出滤波电感电流状态变

量等值变换关系,进一步得到 $\int (I_{ry} - I_y) dt$ 和 $\int (I_r - I) dt$ 之间的等值变换关系,如下式所示

$$[0010] \quad \frac{k_{pi}(I_r - I) + k_{ii} \int (I_r - I) dt}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{piy}(I_{ry} - I_y) + k_{iiy} \int (I_{ry} - I_y) dt}{L_{fy}} \right)$$

[0011] 其中, $k_{piy}$ 和 $k_{iiy}$ 分别为第 $y$ 台变换器电流内环的比例系数和积分系数, $I_{ry}$ 为第 $y$ 台变换器的输出滤波电感电流参考值, $k_{pi}$ 和 $k_{ii}$ 分别为等值单台变换器电流内环的比例系数和积分系数, $I_r$ 为等值单台变换器的输出滤波电感电流参考值, $L_{fy}$ 和 $L_f$ 分别为第 $y$ 台变换器和等值单台变换器的输出滤波电感, $\int$ 、 $d$ 和 $t$ 分别为积分符号、微分算子和时间;

[0012] 步骤3:将直流系统中多台变换器的电压控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量,方法如下:

[0013] 设第 $y$ 台变换器的电压控制积分环节状态变量为 $\int (U_{refy} - U) dt$ ,设等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量为 $\int (U_{ref} - U) dt$ ,由于各台变换器均通过电压外环得到 $I_{ry}$ ,等值单台变换器通过电压外环得到 $I_r$ ,基于步骤2所得到的电流控制积分环节状态变量等值变换关系,进一步获得 $\int (U_{refy} - U) dt$ 和 $\int (U_{ref} - U) dt$ 之间的等值变换关系,如下式所示:

$$[0014] \quad \frac{k_{ii}}{L_f} \left\{ k_{pu}(U_{ref} - U) + k_{iu} \int (U_{ref} - U) dt - I \right\} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{iiy}}{L_{fy}} \left\{ k_{puy}(U_{refy} - U) + k_{iuy} \int (U_{refy} - U) dt - I_y \right\} \right)$$

[0015] 其中, $U_{refy}$ 和 $U_{ref}$ 分别为第 $y$ 台变换器和等值单台变换器的输出电压参考值, $U$ 为直流系统的直流母线电压, $k_{puy}$ 和 $k_{iuy}$ 分别为第 $y$ 台变换器电压外环的比例系数和积分系数, $k_{pu}$ 和 $k_{iu}$ 分别为等值单台变换器电压外环的比例系数和积分系数;

[0016] 步骤4:将直流系统中多台变换器的下垂控制环,等值变换为一个等值单台变换器的下垂控制环,将基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统,建模为一个等值单台变换器;

[0017] 步骤5:整定得到满足稳定性要求的等值单台变换器的电流内环、电压外环和下垂控制环的控制参数;

[0018] 步骤6:基于步骤5整定得到的等值单台变换器的电流内环控制参数,整定直流系统中每台变换器的电流内环控制参数,通过如下公式获得直流系统中每台变换器的电流内环控制参数:

$$[0019] \quad \begin{cases} k_{piy} = \frac{k_{pi} L_{fy}}{L_f} \\ k_{iiy} = \frac{k_{ii} L_{fy}}{L_f} \end{cases}$$

[0020] 步骤7:基于步骤5整定得到的等值单台变换器的电压外环控制参数,整定直流系统中每台变换器的电压外环控制参数,通过如下公式获得直流系统中每台变换器的电压外环控制参数:

$$[0021] \quad \begin{cases} k_{puy} = k_{pu} p_y \\ k_{iuy} = k_{iu} p_y \end{cases}$$

[0022] 式中, $p_y$ 为第 $y$ 台变换器的电流均分系数;

[0023] 步骤8:基于步骤5整定得到的等值单台变换器下垂控制环的控制参数,整定直流系统中每台变换器下垂控制环的控制参数,通过如下公式获得直流系统中每台变换器的下

垂系数：

$$[0024] \quad k_{dy} = \frac{k_d}{P_y}$$

[0025] 式中,  $k_d$  为等值单台变换器的下垂系数,  $k_{dy}$  为第  $y$  台变换器的下垂系数。

### 附图说明

[0026] 图1为多台变换器并联直流系统的控制拓扑；

[0027] 图2为等值单台变换器的控制拓扑；

[0028] 图3为控制参数整定流程图；

[0029] 图4为等值单台变换器电压外环的波特图；

[0030] 图5为场景1时等值单台变换器的零极点图；

[0031] 图6为场景2时等值单台变换器的零极点图；

[0032] 图7为直流系统的仿真波形图；

[0033] 图8为等值单台变换器的仿真波形图。

### 具体实施方式

[0034] 本发明涉及一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法,能够应用于整定多台变换器并联直流电系统的电流内环、电压外环和下垂控制环的控制参数。由于各台变换器之间存在着相互耦合作用,这就使得基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流电系统的控制参数整定要比单台变换器直流系统复杂的多。因为多台变换器并联直流系统可以由一台等值单台变换器进行表示,所以本发明提出一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法。首先,整定等值单台变换器的电流内环、电压外环和下垂控制环的控制参数,并判断控制参数是否满足等值单台变换器的稳定性要求,如不满足,则重新整定。其次,基于等值单台变换器的电流内环控制参数,整定得到直流系统中每台变换器的电流内环控制参数。再次,基于等值单台变换器的电压外环控制参数,整定得到直流系统中每台变换器的电压外环控制参数。最后,基于等值单台变换器的下垂控制环的控制参数,整定得到直流系统中每台变换器的下垂控制环的控制参数。

[0035] 以下将结合附图及具体实施,对本发明提出的一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法进行详细说明。

[0036] (1) 将直流系统中多台变换器的输出滤波电感电流状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的输出滤波电感电流状态变量。

[0037] 设第  $y$  台变换器的输出滤波电感电流为  $I_y$ ,  $y=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为直流系统中所有变换器的总台数,设等值单台变换器的输出滤波电感电流为  $I$ 。将所有变换器的输出滤波电感电流相互累加,并将  $I_y$  和  $I$  作为状态变量,则存在如下关系表达式

$$[0038] \quad I = \sum_{y=1}^n (I_y)$$

[0039] 进而可得如下微分形式

$$[0040] \quad \frac{dI}{dt} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{dI_y}{dt} \right)$$

[0041] 其中,d和t分别为微分算子和时间。

[0042] (2)将直流系统中多台变换器的电流控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量。

[0043] 考虑占空比信号后,直流系统及等值单机可由如下公式进行表示

$$[0044] \quad \frac{D \cdot U_s - U}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{D_y \cdot U_{sy} - U}{L_{fy}} \right)$$

[0045] 其中, $D_y$ 、 $L_{fy}$ 和 $U_{sy}$ 分别为第y台变换器的占空比、输出滤波电感和输入直流电压, $D$ 、 $L_f$ 和 $U_s$ 分别为等值单台变换器的占空比、输出滤波电感和输入直流电压。

[0046] 进而,可以得到如下公式

$$[0047] \quad \begin{cases} \frac{D \cdot U_s}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{D_y \cdot U_{sy}}{L_{fy}} \right) \\ \frac{U}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{U}{L_{fy}} \right) \end{cases}$$

[0048] 当 $U_s = U_{sy}$ 成立时,则

$$[0049] \quad \begin{cases} \frac{D}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{D_y}{L_{fy}} \right) \\ \frac{1}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{1}{L_{fy}} \right) \end{cases}$$

[0050] 由上述公式,可知直流系统中各台变换器的输出滤波电感 $L_{fy}$ 和等值单台变换器的输出滤波电感 $L_f$ 之间的关系表达式。另外,由于各台变换器的输出滤波电容 $C_{fy}$ 相互并联,则也会存在如下公式成立

$$[0051] \quad \frac{1}{C_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{1}{C_{fy}} \right)$$

[0052] 其中, $C_f$ 为等值单台变换器的输出滤波电容。由于各台变换器及等值单台变换器均通过电流内环得到占空比,则可以得到如下公式

$$[0053] \quad \frac{k_{pi}(I_r - I) + k_{ii} \int (I_r - I) dt}{L_f} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{piy}(I_{ry} - I_y) + k_{iiy} \int (I_{ry} - I_y) dt}{L_{fy}} \right)$$

[0054] 其中, $k_{piy}$ 和 $k_{iiy}$ 分别为第y台变换器电流内环的比例系数和积分系数, $I_y$ 和 $I_{ry}$ 分别为第y台变换器的输出滤波电感电流及其参考值, $k_{pi}$ 和 $k_{ii}$ 分别为等值单台变换器电流内环的比例系数和积分系数, $I$ 和 $I_r$ 分别为等值单台变换器的输出滤波电感电流及其参考值, $\int$ 为积分符号, $\int (I_{ry} - I_y) dt$ 和 $\int (I_r - I) dt$ 分别为第y台变换器和等值单台变换器的电流控制积分环节状态变量。

[0055] 由于各台变换器均存在下垂控制环节,故各台变换器的输出滤波电流会呈现比例关系。假设 $p_y$ 为第y台变换器的电流均分系数,则存在 $\sum p_y = 1$ 成立,其中, $\Sigma$ 为累加和符号。则 $\int (I_{ry} - I_y) dt$ 和 $\int (I_r - I) dt$ 两者的关系如下公式所示

$$[0056] \quad \frac{k_{ii} \int (I_r - I) dt}{L_r} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{iyy} p_y \int (I_r - I) dt}{L_{fy}} \right)$$

[0057] (3) 将直流系统中多台变换器的电压控制积分环节状态变量,等值变换为一个等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量。

[0058] 由于各台变换器(或等值单台变换器)均通过电压外环得到 $I_{ry}$ (或 $I_r$ ),且当 $U_{ref} = U_{refy}$ 成立时,则可以得到如下两个公式

$$[0059] \quad \frac{k_{pi}}{L_r} \left\{ k_{pu} (U_{ref} - U) + k_{iu} \int (U_{ref} - U) dt - I \right\} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{piy}}{L_{fy}} \left\{ k_{puy} (U_{refy} - U) + k_{iuy} \int (U_{refy} - U) dt - I_y \right\} \right)$$

$$[0060] \quad \frac{k_{ii}}{L_r} \left\{ k_{pu} (U_{ref} - U) + k_{iu} \int (U_{ref} - U) dt - I \right\} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{iiy}}{L_{fy}} \left\{ k_{puy} (U_{refy} - U) + k_{iuy} \int (U_{refy} - U) dt - I_y \right\} \right)$$

[0061] 其中, $U_{refy}$ 和 $U_{ref}$ 分别为第 $y$ 台变换器和等值单台变换器的输出电压参考值, $U$ 为直流系统的直流母线电压, $k_{puy}$ 和 $k_{iuy}$ 分别为第 $y$ 台变换器电压外环的比例系数和积分系数, $k_{pu}$ 和 $k_{iu}$ 分别为等值单台变换器电压外环的比例系数和积分系数, $\int (U_{refy} - U) dt$ 和 $\int (U_{ref} - U) dt$ 分别为第 $k$ 台变换器和等值单台变换器的电压控制积分环节状态变量。则 $\int (U_{refy} - U) dt$ 和 $\int (U_{ref} - U) dt$ 两者的关系如下公式所示。

$$[0062] \quad \frac{k_{ii} k_{iu} \int (U_{ref} - U) dt}{L_r} = \sum_{y=1}^n \frac{k_{iyy} k_{iuy} \int (U_{refy} - U) dt}{L_{fy}}$$

[0063] (4) 将直流系统中多台变换器的下垂控制环,等值变换为一个等值单台变换器的下垂控制环。

[0064]  $k_{dy}$ 和 $k_d$ 分别为第 $y$ 台变换器和等值单台变换器的下垂系数,并且存在如下关系

$$[0065] \quad k_{dy} = \frac{k_d}{p_y}$$

[0066] 基于上述公式,考虑下垂控制环后,则可以得到如下两个公式

$$[0067] \quad \frac{k_{pi}}{L_r} \left\{ k_{pu} (U_{ref} - (I - I_c) k_d - U) + k_{iu} \int (U_{ref} - (I - I_c) k_d - U) dt - I \right\} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{piy}}{L_{fy}} \left\{ k_{puy} (U_{refy} - (I - I_c) k_{dy} - U) + k_{iuy} \int (U_{refy} - (I - I_c) k_{dy} - U) dt - I_y \right\} \right)$$

$$[0068] \quad \frac{k_{ii}}{L_r} \left\{ k_{pu} (U_{ref} - (I - I_c) k_d - U) + k_{iu} \int (U_{ref} - (I - I_c) k_d - U) dt - I \right\} = \sum_{y=1}^n \left( \frac{k_{iiy}}{L_{fy}} \left\{ k_{puy} (U_{refy} - (I - I_c) k_{dy} - U) + k_{iuy} \int (U_{refy} - (I - I_c) k_{dy} - U) dt - I_y \right\} \right)$$

[0069] 至此,获得了多台变换器并联直流系统的等值单台变换器模型。

[0070] (5) 利用自动控制原理,整定等值单台变换器的电流内环、电压外环和下垂控制环的控制参数。

[0071] 画出等值单台变换器的电流内环的波特图,利用自动控制原理,整定得到等值单台变换器的电流内环控制参数;画出等值单台变换器的电压外环和下垂控制环的波特图,利用自动控制原理,整定得到等值单台变换器的电压外环和下垂控制环的控制参数。如果所整定的控制参数能够满足等值单台变换器的稳定性要求,那么就开始整定直流系统中各台变换器的控制参数;反之,则重新整定等值单台变换器的控制参数。

[0072] (6) 基于等值单台变换器的电流内环控制参数, 整定得到直流系统中每台变换器的电流内环控制参数。

[0073] 直流系统中, 假设第 $y$ 台变换器与第 $y+1$ 台变换器之间的电流内环控制参数关系如下式所示。

$$[0074] \quad \begin{cases} \frac{k_{piy}}{L_{fy}} = \frac{k_{pi(y+1)}}{L_{f(y+1)}} \\ \frac{k_{iiy}}{L_{fy}} = \frac{k_{ii(y+1)}}{L_{f(y+1)}} \end{cases}$$

[0075] 其中,  $k_{pi(y+1)}$  和  $k_{ii(y+1)}$  分别为第 $y+1$ 台变换器电流内环的比例系数和积分系数,  $L_{f(y+1)}$  为第 $y+1$ 台变换器的输出滤波电感。基于等值单台变换器的电流内环控制参数, 通过如下公式就可以获得直流系统中第 $y$ 台变换器的电流内环控制参数。

$$[0076] \quad \begin{cases} k_{piy} = \frac{k_{pi} L_{fy}}{L_f} \\ k_{iiy} = \frac{k_{ii} L_{fy}}{L_f} \end{cases}$$

[0077] (7) 基于等值单台变换器的电压外环控制参数, 整定得到直流系统中每台变换器的电压外环控制参数。

[0078] 直流系统中, 假设第 $y$ 台变换器与第 $y+1$ 台变换器之间的电压外环控制参数关系如下式所示。

$$[0079] \quad \begin{cases} \frac{k_{puy}}{k_{pu(y+1)}} = \frac{\left( \frac{L_{fy} p_y}{k_{piy}} \right)}{\left( \frac{L_{f(y+1)} p_{(y+1)}}{k_{pi(y+1)}} \right)} \\ \frac{k_{iuy}}{k_{iu(y+1)}} = \frac{\left( \frac{L_{fy} p_y}{k_{iiy}} \right)}{\left( \frac{L_{f(y+1)} p_{(y+1)}}{k_{ii(y+1)}} \right)} \end{cases}$$

[0080] 其中,  $k_{pu(y+1)}$  和  $k_{iu(y+1)}$  分别为第 $y+1$ 台变换器电压外环的比例系数和积分系数,  $p_{(y+1)}$  为第 $y+1$ 台变换器的电流均分系数。基于等值单台变换器的电压外环控制参数, 通过如下公式就可以获得直流系统中第 $y$ 台变换器的电压外环控制参数。

$$[0081] \quad \begin{cases} k_{puy} = k_{pu} p_y \\ k_{iuy} = k_{iu} p_y \end{cases}$$

[0082] (8) 基于等值单台变换器下垂控制环的控制参数, 整定得到直流系统中每台变换器下垂控制环的控制参数。

[0083] 基于等值单台变换器的下垂系数, 通过如下公式就可以获得直流系统中第 $y$ 台变换器的下垂系数。

$$[0084] \quad k_{dy} = \frac{k_d}{p_y}$$

[0085] 至此,基于等值单台变换器的控制参数,获得了直流系统中每台变换器的控制参数。

[0086] 为验证本发明所提出的一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法的有效性,基于PLECS搭建了拓扑结构分别如图1和图2所示的多台变换器并联直流系统及其等值单台变换器,开展了仿真验证工作。

[0087] 基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定流程如图3所示。针对等值单台变换器,利用自动控制原理整定场景1和场景2共两组控制参数。其中,场景1和场景2时等值单台变换器电压外环的波特图如图4所示,场景1和场景2时等值单台变换器的零极点图分别如图5和图6所示。由图4至图6可知,场景1和场景2时等值单台变换器的控制参数是满足稳定性要求的。按照本发明所提直流系统控制参数整定方法,得到每台变换器的控制参数。场景1时,图7和图8所示的直流系统及其等值单台变换器的直流母线波形基本一致,直流母线电压的仿真频率均为21.65Hz,与图5所示的22.8Hz理论基本相同。同理,场景2时,图7和图8所示的直流系统及其等值单台变换器的直流母线波形基本一致,直流母线电压的仿真频率均为45.35Hz,与图5所示的47.4Hz理论基本相同。

[0088] 综上所述,本发明所提出的一种基于等值单台变换器的直流系统控制参数整定方法,能够为基于电压电流双环控制的多台变换器并联直流系统的控制参数整定提供便利,提高多台变换器并联直流系统的暂态稳定性。

[0089] 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保护范围之内。

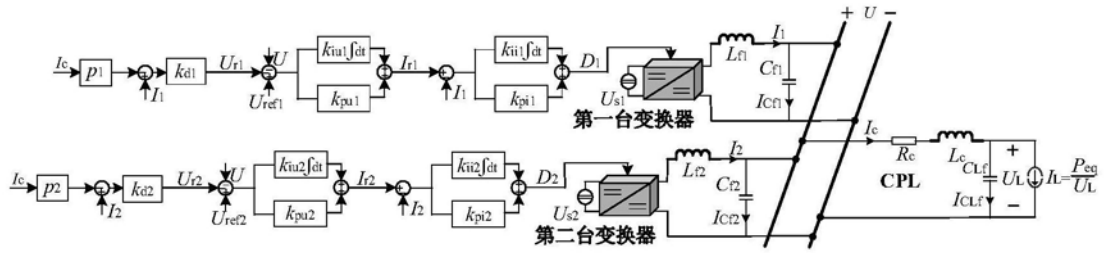


图1

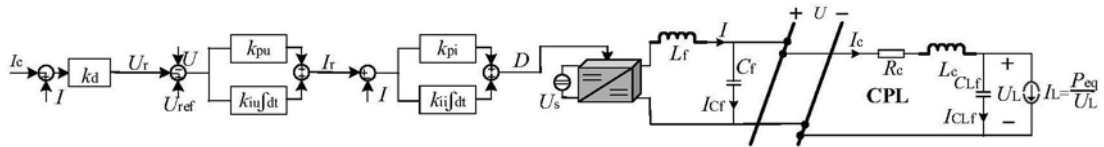


图2

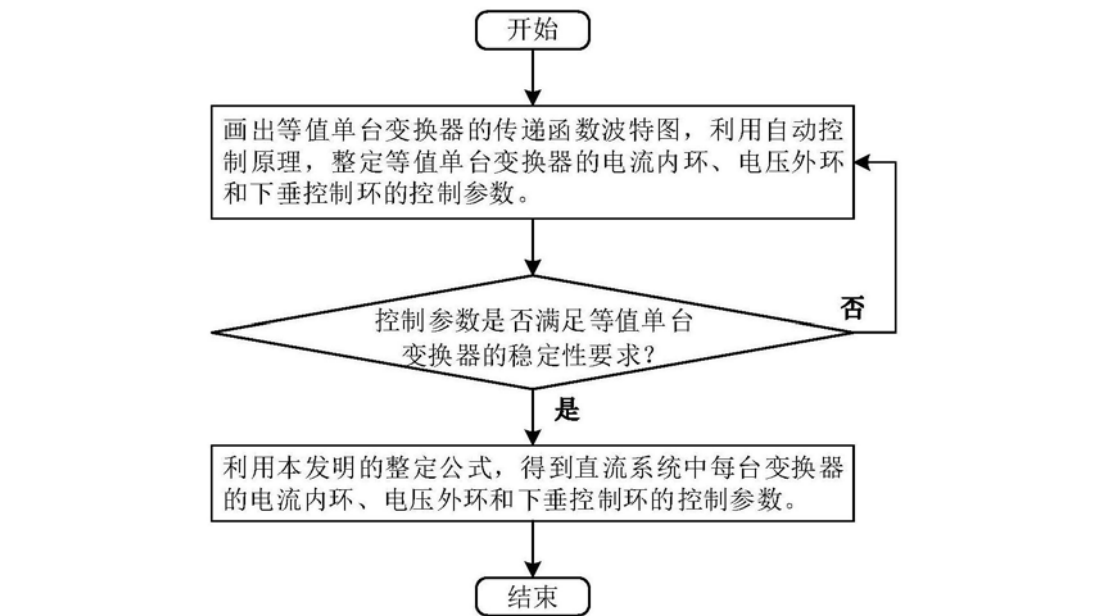


图3

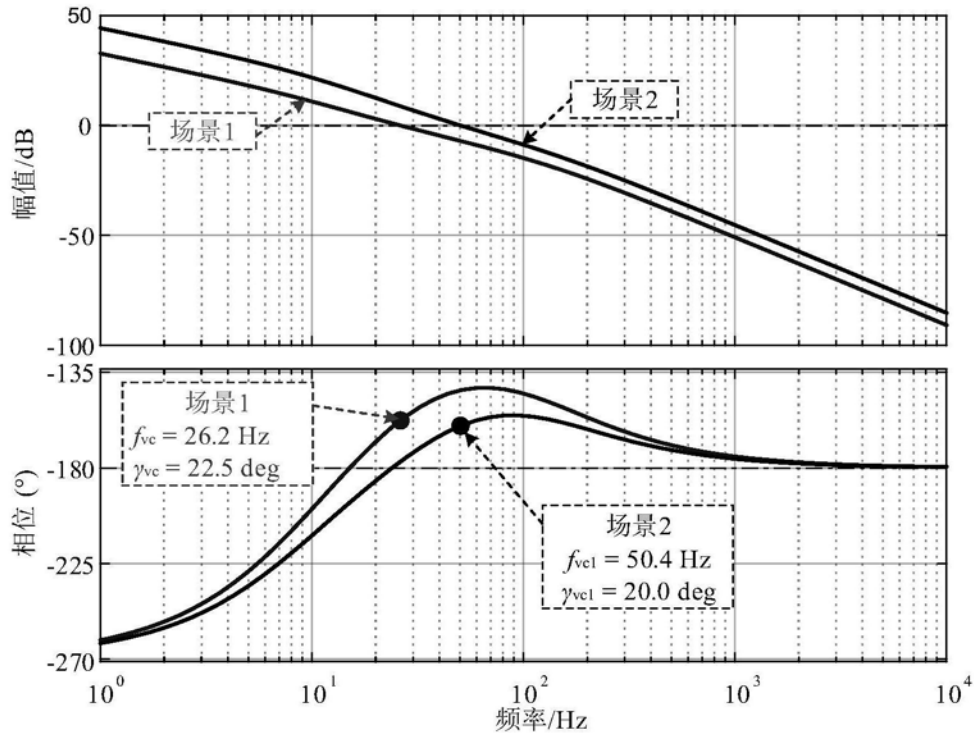


图4

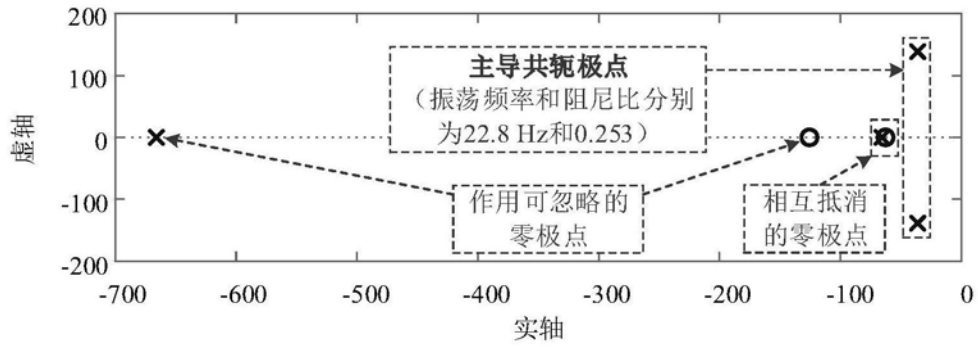


图5

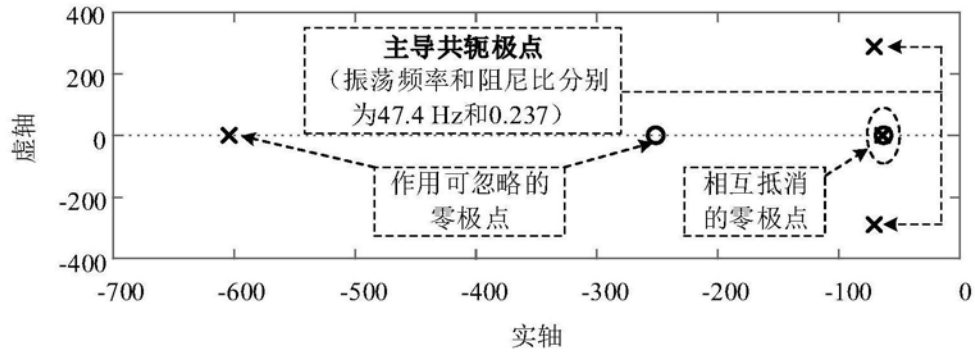


图6

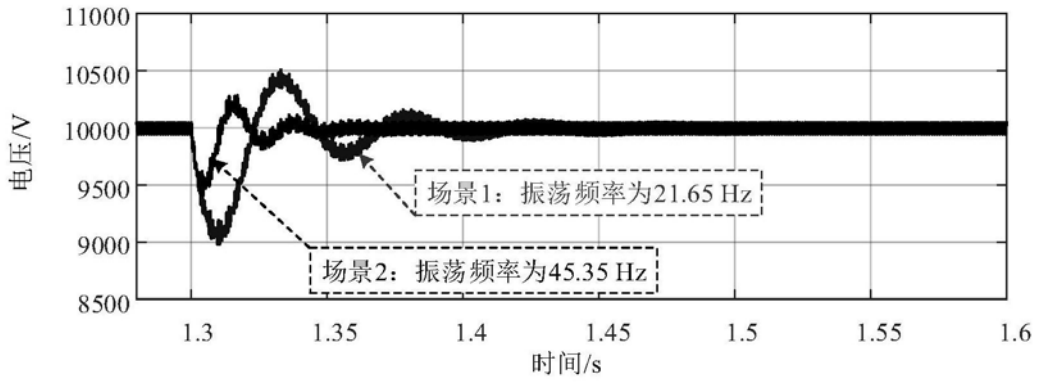


图7

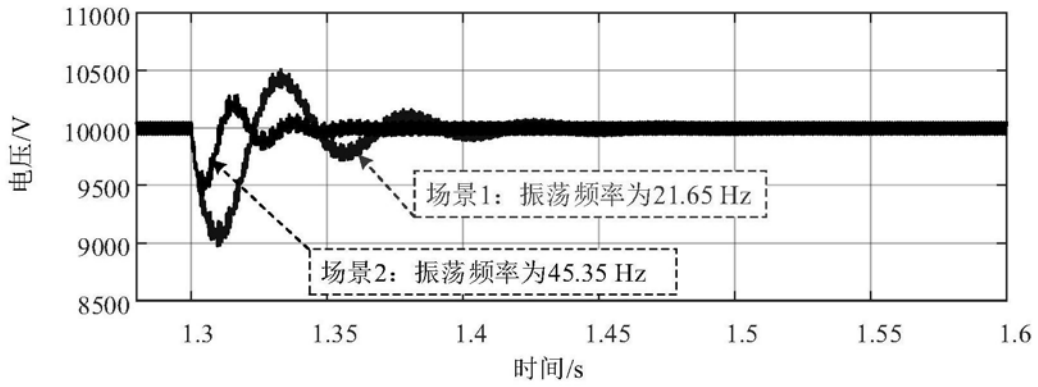


图8