(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108281970 A
(43)申请公布日 2018.07.13

(21)申请号 201711416473.X

(22)申请日 2017.12.25

(71)申请人 华中科技大学
地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路1037号

(72)发明人 胡家兵 常远瞩 张恩博 袁小明

(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心 42201
代理人 曹葆青 廖盈春

(51)Int.Cl.
H02J 3/18(2006.01)

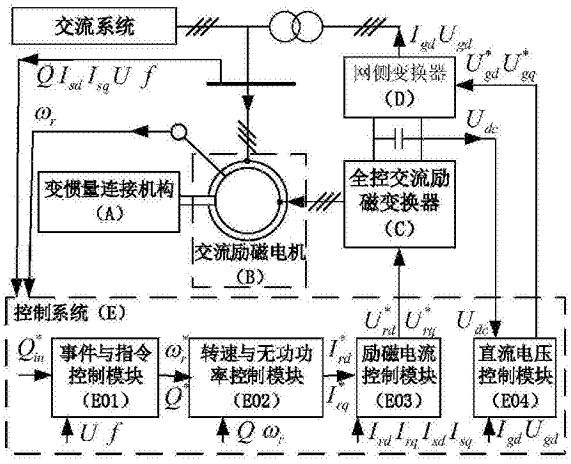
权利要求书4页 说明书11页 附图3页

(54)发明名称

一种交流励磁同步调相机及其控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种交流励磁同步调相机及其控制方法，交流励磁同步调相机包括：交流励磁电机、全控交流励磁变换器、网侧变换器以及控制器；交流励磁电机为核心电能变换装置，其定子、转子绕组均为配置接线端的交流绕组；控制器一方面用于控制全控交流励磁变换器对交流励磁电机进行励磁与调速，另一方面用于控制网侧变换器以保证全控交流励磁变换器的励磁能力，进而实现对有功、无功功率的支撑和调节。控制方法包括：计算交流励磁电机的转速指令、无功功率指令、有功电流指令和无功电流指令，从而获得全控励磁变换器的励磁电压指令以及网侧变换器的控制电压。本发明提供的技术方案兼具经济的无功调节能力、快速的动态无功支撑能力以及高能量惯量比。



CN 108281970 A

1.一种交流励磁同步调相机，其特征在于，包括：交流励磁电机(B)、全控交流励磁变换器(C)、网侧变换器(D)以及控制器(E)；交流励磁电机(B)为核心电能变换装置，其定子、转子绕组均为配置有接线端的交流绕组；所述控制器(E)用于对电压、电流、转速信号进行处理，一方面生成所述全控交流励磁变换器(C)的电压励磁指令，另一方面生成所述网侧变换器(D)的电压控制指令；所述全控交流励磁变换器(C)用于接收所述电压励磁指令，并实施对所述交流励磁电机(B)的有功功率、无功功率独立的调节；所述网侧变换器(D)用于接收所述控制电压指令，并对所述网侧变换器(D)输入的有功功率进行调节，以保障直流母线电压的稳定，进而保证所述全控交流励磁变换器(C)具备充足的励磁控制能力。

2.如权利要求1所述的交流励磁同步调相机，其特征在于，所述控制器(E)包括：事件与指令控制模块(E01)、转速与无功功率控制模块(E02)、励磁电流控制模块(E03)以及直流电压控制模块(E04)；

所述事件与指令控制模块(E01)的第一输入端用于接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，所述事件与指令控制模块(E01)的第二输入端用于接收本地电网的电压及频率信号，所述事件与指令控制模块(E01)用于接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，并采集本地电网的实测电压U以及实测频率f，然后根据预先设定的工作模式、额定电压U_N、额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^{*}$以及转速指令最小值$\omega_{r\min}^{*}$对输入信号进行处理，获得无功功率指令Q*以及转速指令ω_r^{*}；

所述转速与无功功率控制模块(E02)的第一输入端连接至所述事件与指令控制模块(E01)的第一输出端，所述转速与无功功率控制模块(E02)的第二输入端连接至所述事件与指令控制模块(E01)的第二输出端，所述转速与无功功率控制模块(E02)的第三输入端用于接收所述交流励磁同步调相机输出至本地电网的瞬时无功功率Q，所述转速与无功功率控制模块(E02)的第四输入端用于接收交流励磁电机的实测转速ω_r，所述转速与无功功率控制模块(E02)用于接收所述无功功率指令Q*以及所述转速指令ω_r^{*}，并采集所述瞬时无功功率Q以及所述实测转速ω_r，然后根据预先设定的转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^{*}$、转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^{*}$、转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^{*}$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^{*}$，对输入信号进行处理，获得转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}；

所述励磁电流控制模块(E03)的第一输入端连接至所述转速与无功功率控制模块(E02)的第一输出端，所述励磁电流控制模块(E03)的第二输入端连接至所述转速与无功功率控制模块(E02)的第二输出端，所述励磁电流控制模块(E03)的第三输入端用于接收电流信号，所述励磁电流控制模块(E03)用于接收所述转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及所述转子有功电流指令I_{rd}^{*}，并采集所述交流励磁电机(B)的转子有功电流I_{rd}、转子无功电流I_{rq}、定子有功电流I_{sd}、定子无功电流I_{sq}以及滑差角速度ω_s，然后根据所述全控励磁变换器(C)的励磁电流容量最大值I_{max}、所述交流励磁电机(B)的励磁电感L_m以及所述交流励磁电机(B)的转子电感L_r对输入信号进行处理，获得所述全控励磁变换器(C)的励磁电压指令，以控制所述全控励磁变换器(C)执行对所述交流励磁电机(B)的交流励磁；

所述直流电压控制模块(E04)的第一输入端用于接收直流母线电压U_{dc}，所述直流电压控制模块(E04)的第二输入端用于接收本地电网的电压及电流信号，所述直流电压控制模块(E04)用于接收所述直流母线电压U_{dc}，并采集所述网侧变换器(D)输出的有功电流I_{gd}和

无功电流I_{gq}、所述网侧变换器(D)接入点电压的d轴分量U_{gd}和q轴分量U_{gq}，以及电网电压角速度ω_1，并根据直流母线电压指令U_{dc}^*、所述网侧变换器(D)中滤波器的电阻R_g和电感L_g对输入信号进行处理，获得所述网侧变换器(D)的控制电压，以维持直流母线电压的稳定，进而保证所述全控交流励磁变换器(C)具备充足的励磁控制能力。

3.如权利要求1或2所述的交流励磁同步调相机，其特征在于，还包括变惯量连接结构(A)；所述变惯量连接机构(A)连接至所述交流励磁电机(B)的旋转结构，所述变惯量连接机构(A)通过附加连接件或者质量件改变所述交流励磁电机(B)的旋转机构的转动惯量，进而改变所述交流励磁电机(B)的旋转机构存储机械能量的能力。

4.一种基于权利要求1所述的交流励磁同步调相机的控制方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1：根据设定的工作模式，从上级指令或本地控制获得对应的无功功率指令Q^*；

S2：根据本地电网的频率及电机转速信息，获得转速指令ω_r^*；

S3：根据本地电网实测无功功率和无功功率指令的偏差，获得转子无功电流指令I_{rq}^*；

S4：根据交流励磁电机实测转速和转速指令的偏差，获得有转子有功电流指令I_{rd}^*；

S5：根据所述全控交流励磁变换器(C)的容量，对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配，并获得所述全控励磁变换器(C)的励磁电压指令，使得所述全控励磁变换器(C)执行对所述交流励磁电机(B)的独立励磁；

S6：根据实测直流母线电压与直流母线电压指令的偏差计算所述网侧变换器(D)有功电流指令，并得到所述网侧变换器(D)的控制电压指令，以维持直流母线电压的稳定，进而保证所述全控交流励磁变换器(C)具备充足的励磁控制能力。

5.如权利要求4所述的控制方法，其特征在于，所述步骤S1具体包括：若设定的工作模式为从上级指令获得无功功率指令，则接收上级无功功率指令Q_{in}^*，并获得无功功率指令$Q^*=Q_{in}^*$；若设定的工作模式为从本地控制指令获得无功功率指令，则获得本地电网实测电压U并根据预先设定的本地电网额定电压U_N，通过比例积分运算获得无功功率指令$Q^*=K_{pu}(U_N-U)+K_{iu}\int(U_N-U)dt$；其中，$K_{pu}$为无功功率调节器的比例系数，$K_{iu}$为无功功率调节器的积分系数。

6.如权利要求4所述的控制方法，其特征在于，所述步骤S2具体包括：获得本地电网实测频率f并根据预先设定的额定转速同步指令ω_{rN}^*、本地电网额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^*$以及转速指令最小值$\omega_{r\min}^*$，通过比例积分运算获得转速指令ω_r^*；转速指令ω_r^*的计算公式如下：

$$\omega_r^*=\begin{cases}\omega_{r\min}^* & \omega_r^*<\omega_{r\min}^*\\ K_{pf}(f-f_N)+K_{if}\int(f-f_N)dt & \omega_{r\max}^*>\omega_r^*>\omega_{r\min}^*\\ \omega_{r\max}^* & \omega_r^*>\omega_{r\max}^*\end{cases};$$

其中，K_{pf}为转速指令调节器的比例系数，K_{if}为转速指令调节器的积分系数。

7.如权利要求4所述的控制方法，其特征在于，所述步骤S3具体包括：获得交流励磁同步调相机输出至本地电网的瞬时无功功率Q并接收无功功率指令Q^*，根据预先设定的转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^*$以及转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^*$，通过比例积分运算获得转子

无功电流指令I_{rq}^{*}；转子无功电流指令I_{rq}^{*}的计算公式如下：

$$I_{rq}^{*}=\begin{cases} I_{rq\min}^{*} & I_{rq}^{*}<I_{rq\min}^{*} \\ K_{pQ}(Q-Q^{*})+K_{iQ}\int(Q-Q^{*})dt & I_{rq\max}^{*}>I_{rq}^{*}>I_{rq\min}^{*} \\ I_{rq\max}^{*} & I_{rq}^{*}>I_{rq\max}^{*} \end{cases};$$

其中，K_{pQ}为无功电流调节器的比例系数，K_{iQ}为无功电流调节器的积分系数。

8.如权利要求4所述的控制方法，其特征在于，所述步骤S4具体包括：获得交流励磁电机实测转速ω_r并接收转速指令ω_r^{*}，根据预先设定的转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^{*}$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转子有功电流指令I_{rd}^{*}；转子有功电流指令I_{rd}^{*}的计算公式如下：

$$I_{rd}^{*}=\begin{cases} I_{rd\min}^{*} & I_{rd}^{*}<I_{rd\min}^{*} \\ K_{p\omega}(\omega_r^{*}-\omega_r)+K_{i\omega}\int(\omega_r^{*}-\omega_r)dt & I_{rd\max}^{*}>I_{rd}^{*}>I_{rd\min}^{*} \\ I_{rd\max}^{*} & I_{rd}^{*}>I_{rd\max}^{*} \end{cases};$$

其中，$K_{p\omega}$为速度调节器的比例系数，$K_{i\omega}$为速度调节器的积分系数。

9.如权利要求4所述的控制方法，其特征在于，所述步骤S5具体包括如下步骤：

S501：接收转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}；

S502：根据所述全控励磁变换器(C)的励磁电流容量最大值I_{max}，以无功电流优先的方式对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配，获得所述全控励磁变换器(C)的实际有功电流指令I_{rdt}^{*}以及实际无功电流指定I_{rqt}^{*}；经过限制与分配后，全控励磁变换器(C)的实际有功电流指令I_{rdt}^{*}以及实际无功电流指定I_{rqt}^{*}的计算公式如下：

$$\begin{cases} (I_{rdt}^{*}=I_{rd}^{*},I_{rqt}^{*}=I_{rq}^{*}) & \sqrt{I_{rd}^{*2}+I_{rq}^{*2}}\leqslant I_{\max} \\ (I_{rdt}^{*}=Sgn\left(I_{rd}^{*}\right)\sqrt{\max(I_{\max}^{2}-I_{rq}^{*2},0)},I_{rqt}^{*}=I_{rq}^{*}) & \sqrt{I_{rd}^{*2}+I_{rq}^{*2}}>I_{\max} \end{cases};$$

其中：

$$Sgn\left(I_{rd}^{*}\right)=\begin{cases} 1 & I_{rd}^{*}>0 \\ 0 & I_{rd}^{*}=0 \\ -1 & I_{rd}^{*}<0 \end{cases};$$

S503：获得所述交流励磁电机(B)的转子有功电流I_{rd}、所述交流励磁电机(B)的转子无功电流I_{rq}、所述交流励磁电机(B)的定子有功电流I_{sd}、所述交流励磁电机(B)的定子无功电流I_{sq}以及滑差角速度ω_s；

S504：根据所述交流励磁电机(B)的励磁电感L_m以及所述交流励磁电机(B)的转子电感L_r，通过比例积分运算获得励磁电压指令的d轴分量U_{rd}^{*}以及励磁电压指令的q轴分量U_{rq}^{*}；励磁电压指令的d轴分量U_{rd}^{*}以及励磁电压指令的q轴分量U_{rq}^{*}计算公式如下：

$$\begin{cases} U_{rd}^{*}=K_{pi}(I_{rdt}^{*}-I_{rd})+K_{ii}\int(I_{rdt}^{*}-I_{rd})dt+R_rI_{rd}-\omega_s(L_mI_{sq}+L_rI_{rq}) \\ U_{rq}^{*}=K_{pi}(I_{rqt}^{*}-I_{rq})+K_{ii}\int(I_{rqt}^{*}-I_{rq})dt+R_rI_{rq}+\omega_s(L_mI_{sd}+L_rI_{rd}) \end{cases};$$

其中，K_{pi}为励磁电流控制的比例系数，K_{ii}为励磁电流控制的积分系数。

10.如权利要求4所述的控制方法，其特征在于，所述步骤S6具体包括如下步骤：

S601：接收直流母线直流电压指令U_{dc}^{*}并获得实测直流母线直流电压U_{dc}；

S602：根据预先设定的所述网侧变换器(D)输出的有功电流指令最大值$I_{gd\max}^{*}$以及所述网侧变换器(D)输出的有功电流指令最小值$I_{gd\min}^{*}$，通过比例积分运算获得所述网侧变换器(D)输出的有功电流指令I_{gd}^{*}；所述网侧变换器(D)输出的有功电流指令I_{gd}^{*}的计算公式如下：

$$I_{gd}^{*}=\begin{cases} I_{gd\min}^{*} & I_{gd}^{*}<I_{gd\min}^{*} \\ K_{pV}(U_{dc}-U_{dc}^{*})+K_{iV}\int(U_{dc}-U_{dc}^{*})dt & I_{gd\max}^{*}>I_{gd}^{*}>I_{gd\min}^{*} \\ I_{gd\max}^{*} & I_{gd}^{*}>I_{gd\max}^{*} \end{cases};$$

其中，K_{pV}为直流电压器的比例系数，K_{iV}为直流电压器的积分系数；

S603：获得所述网侧变换器(D)输出的有功电流I_{gd}、所述网侧变换器(D)输出的无功电流I_{gq}、所述网侧变换器(D)接入点电压的d轴分量U_{gd}、所述网侧变换器(D)接入点电压的q轴分量U_{gq}以及电网电压角速度ω_1；

S604：根据所述网侧变换器(D)中滤波器的电阻R_g以及所述网侧变换器(D)中滤波器的电感L_g，通过比例积分运算获得所述网侧变换器(D)的控制电压指令的d轴分量U_{gd}^{*}以及所述网侧变换器(D)的控制电压指令的q轴分量U_{gq}^{*}；所述网侧变换器(D)的控制电压指令的d轴分量U_{gd}^{*}以及所述网侧变换器(D)的控制电压指令的q轴分量U_{gq}^{*}的计算公式如下：

$$\begin{cases} U_{gd}^{*}=K_{pig}(I_{gd}^{*}-I_{gd})+K_{iig}\int(I_{gd}^{*}-I_{gd})dt+R_gI_{gd}+U_{gd}-\omega_1L_gI_{gq} \\ U_{gq}^{*}=K_{pig}(I_{gq}^{*}-I_{gq})+K_{iig}\int(I_{gq}^{*}-I_{gq})dt+R_gI_{gq}+U_{gq}+\omega_1L_gI_{gd} \end{cases};$$

其中，K_{pig}为网侧变换器(D)并网电流控制器的比例系数，K_{iig}为网侧变换器(D)并网电流控制器的积分系数。

一种交流励磁同步调相机及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统关键电力装备研究、制造领域，更具体地，涉及一种交流励磁同步调相机及其控制方法。

背景技术

[0002] 随着清洁能源发电呈现“大规模开发，远距离输送”的格局，更高比例的电力能源将由外部输电通道，尤其是直流输电通道，送入中东部地区，中东部负荷中心电网必将发展成为本地电源占比有限的典型弱受端电网。为了保证弱受端电网的供电可靠性与电能质量，弱受端电网必须具备以下三个能力：1、快速的动态无功支撑能力；2、经济的静态无功调节能力；3、充足的惯性支撑能力。

[0003] 基于同步电机的同步调相机通过调节其励磁电压可以起到调节无功功率并支撑本地电网电压的作用。然而，由于其励磁绕组时间常数较大，同步调相机无法实现对动态无功的快速调节；此外，由于同步调相机基于直流励磁且不具有原动机拖动，运行中的调相机必须维持在同步速附近的安全转速区域，当系统发生频率扰动事件时，基于同步机的同步调相机能够释放的惯量支撑十分有限，即无法满足弱受端电网对惯性支撑的需求。

[0004] 基于全控电力电子器件的静止无功补偿装置(Static Var Generator，SVG)可实现无功的快速调节，但由于其变流器直接与电网相连，装备实际容量与调节能力受器件容量约束而造价高昂，经济性较差；此外，受限于其本身工作特性，SVG不具备对系统的惯性支撑能力。

[0005] 若仍然沿用传统无功补偿装备去增强弱受端电网需要的三个能力就必然面临大量重复建设的问题，且计及SVG极为昂贵的成本及同步调相机较弱的惯性支撑能力，这种重复建设必然是不可以接受的。

[0006] 总的来说，现有的无功调节装置无法同时满足无功支撑的快速性和经济性需求以及兼有相当的惯性支撑能力。

发明内容

[0007] 针对现有技术的缺陷和改进需求，本发明提供了一种交流励磁同步调相机及其控制方法，旨在解决现有的电网无功调节装置无法同时满足电网对无功支撑的经济性、快速性需求以及对惯性支撑能力需求的问题。

[0008] 为实现上述目的，按照本发明的第一方面，提供了一种交流励磁同步调相机，包括：交流励磁电机、全控交流励磁变换器、网侧变换器以及控制器；交流励磁电机为核心电能变换装置，其定子、转子绕组均为配置接线端的交流绕组；控制器用于对电压、电流信号进行处理，一方面生成全控交流励磁变换器的电压励磁指令，另一方面生成网侧变换器的电压控制指令；全控交流励磁变换器用于接收控制器生成的电压励磁指令，并对所述交流励磁电机的有功、无功进行独立的交流励磁，从而实现对所述交流励磁电机的有功功率以及无功功率的独立控制；网侧变换器用于接收控制器生成的控制电压指令，并对有功功率

进行调节以保障直流母线电压的稳定，进而保证全控交流励磁变换器具备充足的励磁控制能力。

[0009] 进一步地，控制器包括：事件与指令控制模块、转速与无功功率控制模块、励磁电流控制模块以及直流电压控制模块；

[0010] 事件与指令控制模块的第一输入端用于接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，事件与指令控制模块的第二输入端用于接收本地电网的电压及频率信号，事件与指令控制模块接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，并采集本地电网的实测电压U以及实测频率f，然后根据预先设定的工作模式、额定电压U_N、额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^{*}$以及转速指令最小值$\omega_{r\min}^{*}$对输入信号进行处理，获得无功功率指令Q*以及转速指令ω_r^{*}；

[0011] 转速与无功功率控制模块的第一输入端连接至事件与指令控制模块的第一输出端，转速与无功功率控制模块的第二输入端连接至事件与指令控制模块的第二输出端，转速与无功功率控制模块的第三输入端用于接收交流励磁同步调相机输出至本地电网的瞬时无功功率Q，转速与无功功率控制模块的第四输入端用于接收交流励磁电机实测转速ω_r，转速与无功功率控制模块用于接收事件与指令控制模块输出的无功功率指令Q*以及转速指令ω_r^{*}，并采集交流励磁同步调相机输出至本地电网的瞬时无功功率Q以及交流励磁电机实测转速ω_r，然后根据预先设定的转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^{*}$、转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^{*}$、转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^{*}$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^{*}$，对输入信号进行处理，获得转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}；

[0012] 励磁电流控制模块的第一输入端连接至转速与无功功率控制模块的第一输出端，励磁电流控制模块的第二输入端连接至转速与无功功率控制模块的第二输出端，励磁电流控制模块的第三输入端用于接收电流信号，励磁电流控制模块用于接收转速与无功功率控制模块输出的转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}，并采集交流励磁电机的转子有功电流I_{rd}、交流励磁电机的转子无功电流I_{rq}、交流励磁电机的定子有功电流I_{sd}、交流励磁电机的定子无功电流I_{sq}以及滑差角速度ω_s，然后根据全控励磁变换器的励磁电流容量最大值I_{max}、交流励磁电机的励磁电感L_m以及交流励磁电机的转子电感L_r对输入信号进行处理，获得全控励磁变换器的励磁电压指令，以控制全控励磁变换器执行对交流励磁电机的交流励磁；

[0013] 直流电压控制模块的第一输入端用于接收直流母线电压U_{dc}，直流电压控制模块的第二输入端用于接收本地电网的电压及电流信号，直流电压控制模块用于接收直流母线电压U_{dc}，并采集网侧变换器输出的有功电流I_{gd}、网侧变换器输出的无功电流I_{gq}、网侧变换器接入点电压的d轴分量U_{gd}、网侧变换器接入点电压的q轴分量U_{gq}以及电网电压角速度ω_1，并根据直流母线电压指令U_{dc}^{*}、网侧变换器中滤波器的电阻R_g以及网侧变换器中滤波器的电感L_g对输入信号进行处理，获得网侧变换器的控制电压，以维持直流母线电压的稳定，进而保证全控交流励磁变换器具备充足的励磁控制能力。

[0014] 直流母线电压指令U_{dc}^{*}、额定电压U_N、额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^{*}$、转速指令最小值$\omega_{r\min}^{*}$、转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^{*}$、转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^{*}$、转子有功电

流指令最大值$I^*_{rd\max}$以及转子有功电流指令最小值$I^*_{rd\min}$为根据实际工况预先设定的参数；全控励磁变换器的励磁电流容量最大值I_{max}、交流励磁电机的励磁电感L_m、流励磁电机的及转子电感L_r、网侧变换器中滤波器的电阻R_g以及网侧变换器中滤波器的电感L_g为器件的自身参数。

[0015] 进一步地，交流励磁调相机还包括变惯量连接结构；变惯量连接机构连接至交流励磁电机的旋转结构，变惯量连接机构通过附加连接件或者质量件改变交流励磁电机的旋转机构的转动惯量，进而改变交流励磁电机的旋转机构存储机械能量的能力。

[0016] 更进一步地，变惯量连接机构附加的用于改变交流励磁电机的旋转机构的转动惯量的连接件或者质量件包括：飞轮、紧急加速机构以及紧急制动机构；优选地，变惯量连接机构通过接驳飞轮以增强交流励磁电机的旋转机构的有功功率调节能力。

[0017] 交流励磁同步调相机向电网提供的有功功率支撑来自于变惯量连接机构及交流励磁电机转子中储存的机械能；交流励磁同步调相机向电网提供的无功功率支撑来自于全控交流励磁变换器对交流励磁电机的励磁作用及网侧变换器向电网提供的无功功率；控制器用于控制交流励磁同步调相机内部机械能与电能之间的平衡和外部的支撑行为。

[0018] 进一步地，交流励磁电机的定子与转子均为配置有接线端的交流绕组；其中，定子绕组通过并网机构直接与电网相连，转子绕组连接至全控交流励磁变换器。

[0019] 进一步地，网侧变换器具有双向功率流通能力，既能够从电网吸收有功功率或者无功功率，也能够向电网释放有功功率或者无功功率，以维持直流母线电压的稳定。

[0020] 更进一步地，网侧变换器通过增配储能装置以进一步实现调频控制和无功功率调节。

[0021] 进一步地，全控交流励磁变换器与网侧变换器的连接方式包括：直接相连和经变换器相连。

[0022] 进一步地，全控交流励磁变换器和网侧变换器中的变换器装置为两电平或多电平电力电子变换装置；全控交流励磁变换器和网侧变换器的连接结构可为级联结构或者多相多重连接结构。

[0023] 进一步地，控制器可采用集中控制策略或者分散控制策略。

[0024] 结合本发明的第一方面，本发明还提供了一种控制方法，包括如下步骤：

[0025] S1：根据设定的工作模式，从上级指令或本地控制获得对应的无功功率指令Q^*；

[0026] S2：根据本地电网的频率及电机转速信息，获得转速指令ω_r^*；

[0027] S3：根据本地电网实测无功功率和无功功率指令的偏差，获得转子无功电流指令I^*_{rq}；

[0028] S4：根据交流励磁电机实测转速和转速指令的偏差，获得有转子有功电流指令I^*_{rd}；

[0029] S5：根据全控交流励磁变换器的容量，对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配，并根据全控励磁变换器的实际有功电流指令I^*_{rdt}以及实际无功电流指定I^*_{rqt}获得全控励磁变换器的励磁电压指令，使得全控励磁变换器执行对交流励磁电机的独立励磁；

[0030] S6：根据实测直流母线电压与直流母线电压指令的偏差计算网侧变换器有功电流

指令，并得到网侧变换器的控制电压指令，以维持直流母线电压的稳定，进而保证全控交流励磁变换器具备充足的励磁控制能力。

[0031] 步骤S1～步骤S6中，根据输入信号获得输出信号的计算方法包括：基于比例的计算方法、比例-积分的无静态误差调节方法、基于设定下垂曲线的调节方法；优选地，步骤S1～步骤S6中，根据输入信号获得输出信号的计算方法为比例-积分的无静态误差调节方法，以减小计算的复杂程度，并消除静态误差。

[0032] 进一步地，步骤S1具体包括：若设定的工作模式为从上级指令获得无功功率指令，则接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，并获得无功功率指令$Q^{*}=Q_{in}^{*}$；若设定的工作模式为从本地控制指令获得无功功率指令，则获得本地电网实测电压U并根据预先设定的本地电网额定电压U_N，通过比例积分运算获得无功功率指令$Q^{*}=K_{pu}(U_N-U)+K_{iu}\int(U_N-U)dt$；其中，$K_{pu}$为无功功率调节器的比例系数，$K_{iu}$为无功功率调节器的积分系数。

[0033] 进一步地，步骤S2具体包括：获得本地电网实测频率f并根据预先设定的额定转速同步指令ω_{rN}^{*}、本地电网额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^{*}$以及转速指令最小值$\omega_{r\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转速指令ω_r^{*}；转速指令ω_r^{*}的计算公式如下：

[0034] $$\omega_r^{*}=\begin{cases}\omega_{r\min}^{*} & \omega_r^{*}<\omega_{r\min}^{*}\\ K_{pf}(f-f_N)+K_{if}\int(f-f_N)dt & \omega_{r\max}^{*}>\omega_r^{*}>\omega_{r\min}^{*}\\ \omega_{r\max}^{*} & \omega_r^{*}>\omega_{r\max}^{*}\end{cases};$$

[0035] 其中，K_{pf}为转速指令调节器的比例系数，K_{if}为转速指令调节器的积分系数。

[0036] 进一步地，步骤S3具体包括：获得本地电网实测无功功率Q并接收无功功率指令Q^{*}，根据预先设定的转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^{*}$以及转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转子无功电流指令I_{rq}^{*}；转子无功电流指令I_{rq}^{*}的计算公式如下：

[0037] $$I_{rq}^{*}=\begin{cases}I_{rq\min}^{*} & I_{rq}^{*}<I_{rq\min}^{*}\\ K_{pQ}(Q-Q^{*})+K_{iQ}\int(Q-Q^{*})dt & I_{rq\max}^{*}>I_{rq}^{*}>I_{rq\min}^{*}\\ I_{rq\max}^{*} & I_{rq}^{*}>I_{rq\max}^{*}\end{cases};$$

[0038] 其中，K_{pQ}为无功电流调节器的比例系数，K_{iQ}为无功电流调节器的积分系数。

[0039] 进一步地，步骤S4具体包括：获得交流励磁电机实测转速ω_r并接收转速指令ω_r^{*}，根据预先设定的转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^{*}$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转子有功电流指令I_{rd}^{*}；转子有功电流指令I_{rd}^{*}的计算公式如下：

[0040] $$I_{rd}^{*}=\begin{cases}I_{rd\min}^{*} & I_{rd}^{*}<I_{rd\min}^{*}\\ K_{p\omega}(\omega_r^{*}-\omega_r)+K_{i\omega}\int(\omega_r^{*}-\omega_r)dt & I_{rd\max}^{*}>I_{rd}^{*}>I_{rd\min}^{*}\\ I_{rd\max}^{*} & I_{rd}^{*}>I_{rd\max}^{*}\end{cases};$$

[0041] 其中，$K_{p\omega}$为速度调节器的比例系数，$K_{i\omega}$为速度调节器的积分系数。

[0042] 进一步地，步骤S5具体包括如下步骤：

[0043] S501：接收转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}；

[0044] S502：根据全控励磁变换器的励磁电流容量最大值I_{max}，对动态有功电流指令和无

功电流指令进行限制与分配，以获得全控励磁变换器的实际有功电流指令I_{rdt}^{*}以及实际无功电流指定I_{rqt}^{*}；

[0045] S503：获得全控励磁变换器的实际有功电流I_{rd}、全控励磁变换器的实际无功电流I_{rq}、交流励磁电机的定子有功电流I_{sd}、交流励磁电机的定子无功电流I_{sq}以及滑差角速度ω_s；

[0046] S504：根据交流励磁电机的励磁电感L_m以及交流励磁电机的转子电感L_r，通过比例积分运算获得励磁电压指令的d轴分量U_{rd}^{*}以及励磁电压指令的q轴分量U_{rq}^{*}；励磁电压指令的d轴分量U_{rd}^{*}以及励磁电压指令的q轴分量U_{rq}^{*}计算公式如下：

[0047] $$\begin{cases} U_{rd}^{*}=K_{pi}(I_{rdt}^{*}-I_{rd})+K_{ii}\int(I_{rdt}^{*}-I_{rd})dt+R_rI_{rd}-\omega_s(L_mI_{sq}+L_rI_{rq}) \\ U_{rq}^{*}=K_{pi}(I_{rqt}^{*}-I_{rq})+K_{ii}\int(I_{rqt}^{*}-I_{rq})dt+R_rI_{rq}+\omega_s(L_mI_{sd}+L_rI_{rd}) \end{cases};$$

[0048] 其中，K_{pi}为励磁电流控制的比例系数，K_{ii}为励磁电流控制的积分系数。

[0049] 优选地，步骤S502中，对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配的方式为无功电流优先的方式，以保证交流磁力同步调相机对电网的无功功率支撑；经过限制与分配后，全控励磁变换器的实际有功电流指令I_{rdt}^{*}以及实际无功电流指定I_{rqt}^{*}的计算公式如下：

[0050] $$\begin{cases} (I_{rdt}^{*}=I_{rd}^{*},I_{rqt}^{*}=I_{rq}^{*}) & \sqrt{I_{rd}^{*2}+I_{rq}^{*2}}\leqslant I_{\max} \\ (I_{rdt}^{*}=Sgn\left(I_{rd}^{*}\right)\sqrt{\max(I_{\max}^{2}-I_{rq}^{*2},0)},I_{rqt}^{*}=I_{rq}^{*}) & \sqrt{I_{rd}^{*2}+I_{rq}^{*2}}>I_{\max} \end{cases};$$

[0051] 其中：

[0052] $$Sgn\left(I_{rd}^{*}\right)=\begin{cases} 1 & I_{rd}^{*}>0 \\ 0 & I_{rd}^{*}=0 \\ -1 & I_{rd}^{*}<0 \end{cases}。$$

[0053] 进一步地，步骤S6具体包括如下步骤：

[0054] S601：接收直流母线直流电压指令U_{dc}^{*}并获得直流母线电压U_{dc}；

[0055] S602：根据网侧变换器输出的有功电流指令最大值$I_{gd\max}^{*}$以及网侧变换器输出的有功电流指令最小值$I_{gd\min}^{*}$，通过比例积分运算获得网侧变换器输出的有功电流指令I_{gd}^{*}；网侧变换器输出的有功电流指令I_{gd}^{*}的计算公式如下：

[0056] $$I_{gd}^{*}=\begin{cases} I_{gd\min}^{*} & I_{gd}^{*}<I_{gd\min}^{*} \\ K_{pV}(U_{dc}-U_{dc}^{*})+K_{iV}\int(U_{dc}-U_{dc}^{*})dt & I_{gd\max}^{*}>I_{gd}^{*}>I_{gd\min}^{*} \\ I_{gd\max}^{*} & I_{gd}^{*}>I_{gd\max}^{*} \end{cases};$$

[0057] 其中，K_{pV}为直流电压器的比例系数，K_{iV}为直流电压器的积分系数；

[0058] S603：获得网侧变换器输出的有功电流I_{gd}、网侧变换器输出的无功电流I_{gq}、网侧变换器接入点电压的d轴分量U_{gd}、网侧变换器接入点电压的q轴分量U_{gq}以及电网电压角速度ω_1；

[0059] S604：根据预先设定的网侧变换器中滤波器的电阻R_g以及网侧变换器中滤波器的电感L_g，通过比例积分运算获得网侧变换器的控制电压指令的d轴分量U_{gd}^*以及网侧变换器的控制电压指令的q轴分量U_{gq}^*；网侧变换器的控制电压指令的d轴分量U_{gd}^*以及网侧变换器的控制电压指令的q轴分量U_{gq}^*的计算公式如下：

[0060] $$\begin{cases} U_{gd}^* = K_{pig}(I_{gd}^* - I_{gd}) + K_{iig}\int (I_{gd}^* - I_{gd})dt + R_g I_{gd} + U_{gd} - \omega_1 L_g I_{gq} \\ U_{gq}^* = K_{pig}(I_{gq}^* - I_{gq}) + K_{iig}\int (I_{gq}^* - I_{gq})dt + R_g I_{gq} + U_{gq} + \omega_1 L_g I_{gd} \end{cases};$$

[0061] 其中，K_{pig}为网侧变换器并网电流控制器的比例系数，K_{iig}为网侧变换器并网电流控制器的积分系数。

[0062] 总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案，能够取得以下有益效果：

[0063] (1)具备更快的励磁响应时间常数，能够满足动态无功支撑的需求；

[0064] (2)交流励磁电机具备转子机构变速恒频工作能力，在变惯量连接机构的配合下，能够通过旋转机构储存或释放更多的机械动能，增强电网惯性水平以及一定的惯性支撑能力，从而满足电网对惯性支撑能力的要求；

[0065] (3)相对于现有基于全控电力电子器件的静止无功补偿装置，该方案具备显著的经济性优势。

附图说明

[0066] 图1是本发明实施例提供的交流励磁同步调相机的结构框图；

[0067] 图2是本发明实施例提供的控制方法的流程图；

[0068] 图3是本发明提供的交流励磁同步调相机及其控制方法的一种应用实例；

[0069] 图4是本发明应用于直流闭锁事件的效果示意图；

[0070] 图5是本发明应用于交流短路事件的效果示意图。

[0071] 在所有附图中，相同的附图标记用来表示相同的元件或者结构，其中：

[0072] A为变惯量连接机构，B为交流励磁电机，C为全控交流励磁变换器，D为网侧变换器，E为控制器，E01为事件与指令控制模块，E02为转速与无功功率控制模块，E03为励磁电流控制模块，E04为直流电压控制模块。

具体实施方式

[0073] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0074] 本发明提供的交流励磁同步调相机，如图1所示，包括：变惯量连接机构A、交流励磁电机B、全控交流励磁变换器C、网侧变换器D以及控制器E；交流励磁电机B为核心电能变换装置，其定子、转子绕组均为配置接线端的交流绕组；变惯量连接机构A连接至交流励磁电机B的旋转结构，变惯量连接机构A通过附加连接件或者质量件改变交流励磁电机B的旋转机构的转动惯量，进而改变交流励磁电机B的旋转机构存储机械能量的能力；控制器E用

于对电压、电流信号进行处理，一方面生成全控交流励磁变换器C的电压励磁指令，另一方面生成网侧变换器D的电压控制指令；全控交流励磁变换器C用于接收控制器E生成的电压励磁指令，并对所述交流励磁电机B的有功、无功进行独立的交流励磁，从而实现对所述交流励磁电机B的有功功率以及无功功率的独立控制；网侧变换器D用于接收控制器E生成的控制电压指令，并对有功功率进行调节以保障直流母线电压的稳定，进而保证全控交流励磁变换器C具备充足的励磁控制能力。

[0075] 控制器E包括：事件与指令控制模块E01、转速与无功功率控制模块E02、励磁电流控制模块E03以及直流电压控制模块E04；

[0076] 事件与指令控制模块E01的第一输入端用于接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，事件与指令控制模块E01的第二输入端用于接收本地电网的电压及频率信号，事件与指令控制模块E01接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，并采集本地电网的实测电压U以及实测频率f，然后根据预先设定的额定电压U_N、额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^{*}$以及转速指令最小值$\omega_{r\min}^{*}$对输入信号进行处理，获得无功功率指令Q*以及转速指令ω_r^{*}；

[0077] 转速与无功功率控制模块E02的第一输入端连接至事件与指令控制模块E01的第一输出端，转速与无功功率控制模块E02的第二输入端连接至事件与指令控制模块E01的第二输出端，转速与无功功率控制模块E02的第三输入端用于接收交流励磁同步调相机输出至本地电网的瞬时无功功率Q，转速与无功功率控制模块E02的第四输入端用于接收交流励磁电机实测转速ω_r，转速与无功功率控制模块E02用于接收事件与指令控制模块E01输出的无功功率指令Q*以及转速指令ω_r^{*}，并采集交流励磁同步调相机输出至本地电网的瞬时无功功率Q以及交流励磁电机实测转速ω_r，然后根据预先设定的转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^{*}$、转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^{*}$、转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^{*}$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^{*}$，对输入信号进行处理，获得转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}；

[0078] 励磁电流控制模块E03的第一输入端连接至转速与无功功率控制模块E02的第一输出端，励磁电流控制模块E03的第二输入端连接至转速与无功功率控制模块E02的第二输出端，励磁电流控制模块E03的第三输入端用于接收电流信号，励磁电流控制模块E03用于接收转速与无功功率控制模块E02输出的转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}，并采集交流励磁电机B的转子有功电流I_{rd}、交流励磁电机B的转子无功电流I_{rq}、交流励磁电机B的定子有功电流I_{sd}、交流励磁电机B的定子无功电流I_{sq}以及滑差角速度ω_s，然后根据全控励磁变换器C的励磁电流容量最大值I_{max}、交流励磁电机B的励磁电感L_m以及交流励磁电机B的转子电感L_r对输入信号进行处理，获得全控励磁变换器C的励磁电压指令，使得全控励磁变换器C执行对交流励磁电机B的交流励磁；

[0079] 直流电压控制模块E04的第一输入端用于接收直流母线电压U_{dc}，直流电压控制模块E04的第二输入端用于接收本地电网的电压及电流信号，直流电压控制模块E04用于接收直流母线电压U_{dc}的实际值，并采集网侧变换器D输出的有功电流I_{gd}、网侧变换器D输出的无功电流I_{gq}、网侧变换器D接入点电压的d轴分量U_{gd}、网侧变换器D接入点电压的q轴分量U_{gq}以及电网电压角速度ω_1，并根据直流母线电压指令U_{dc}^{*}、网侧变换器D中滤波器的电阻R_g以及

网侧变换器D中滤波器的电感L_g对输入信号进行处理，获得网侧变换器D的控制电压，以维持直流母线电压的稳定，进而保证全控交流励磁变换器C具备充足的励磁控制能力。

[0080] 直流母线电压指令U_{dc}^*、额定电压U_N、额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^*$、转速指令最小值$\omega_{r\min}^*$、转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^*$、转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^*$、转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^*$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^*$为根据实际工况预先设定的参数；全控励磁变换器C的励磁电流容量最大值I_{max}、交流励磁电机B的励磁电感L_m、流励磁电机B的及转子电感L_r、网侧变换器D中滤波器的电阻R_g以及网侧变换器D中滤波器的电感L_g为器件的自身参数。

[0081] 变惯量连接机构A附加的用于改变交流励磁电机B的旋转机构的转动惯量的连接件或者质量件包括：紧急加速机构以及紧急制动机构；优选地，变惯量连接机构A通过接驳飞轮以增强交流励磁电机B的旋转机构的有功功率调节能力。

[0082] 交流励磁同步调相机向电网提供的有功功率支撑来自于变惯量连接机构A及交流励磁电机B转子中储存的机械能；交流励磁同步调相机向电网提供的无功功率支撑来自于全控交流励磁变换器C对交流励磁电机B的励磁作用及网侧变换器D向电网提供的无功功率；控制器E用于控制交流励磁同步调相机内部机械能与电能之间的平衡和外部的支撑行为。

[0083] 交流励磁电机B的定子与转子均为配置有接线端的交流绕组；其中，定子绕组通过并网机构直接与电网相连，转子绕组连接至全控交流励磁变换器C。

[0084] 在本实施例中，交流励磁电机B为双馈电机。

[0085] 网侧变换器D具有双向功率流通能力，既能够从电网吸收有功功率或者无功功率，也能够向电网释放有功功率或者无功功率，以维持直流母线电压的稳定。

[0086] 网侧变换器D通过增配储能装置以进一步实现调频控制和无功功率调节。

[0087] 全控交流励磁变换器C与网侧变换器D的连接方式包括：直接相连和经变换器相连；在本实施例中，全控交流励磁变换器C与网侧变换器D直接相连。

[0088] 全控交流励磁变换器C和网侧变换器D中的变换器装置为两电平电力电子变换装置。

[0089] 控制器E采用集中控制策略。

[0090] 本发明提供的控制方法，如图2所示，包括如下步骤：

[0091] S1：根据设定的工作模式，从上级指令或本地控制获得对应的无功功率指令Q^*；

[0092] S2：根据本地电网的频率及电机转速信息，获得转速指令ω_r^*；

[0093] S3：根据本地电网实测无功功率和无功功率指令的偏差，获得转子无功电流指令I_{rq}^*；

[0094] S4：根据交流励磁电机实测转速和转速指令的偏差，获得有转子有功电流指令I_{rd}^*；

[0095] S5：根据全控交流励磁变换器C的容量，对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配，并根据全控励磁变换器C的实际有功电流指令I_{rdt}^*以及实际无功电流指定I_{rqt}^*获得全控励磁变换器C的励磁电压指令，使得全控励磁变换器C执行对交流励磁电机B的独立励磁；

[0096] S6：根据实测直流母线电压与直流母线电压指令的偏差计算网侧变换器D有功电流指令，并得到网侧变换器D的控制电压指令，以维持直流母线电压的稳定，进而保证全控交流励磁变换器C具备充足的励磁控制能力。

[0097] 步骤S1～步骤S6中，根据输入信号获得输出信号的计算方法包括：基于比例的计算方法、比例-积分的无静态误差调节方法、基于设定下垂曲线的调节方法；在本实施例中，步骤S1～步骤S6中，根据输入信号获得输出信号的计算方法为比例-积分的无静态误差调节方法，以减小计算的复杂程度，并消除静态误差。

[0098] 进一步地，步骤S1具体包括：若设定的工作模式为从上级指令获得无功功率指令，则接收上级无功功率指令Q_{in}^{*}，并获得无功功率指令$Q^{*}=Q_{in}^{*}$；若设定的工作模式为从本地控制指令获得无功功率指令，则获得本地电网实测电压U并根据预先设定的本地电网额定电压U_N，通过比例积分运算获得无功功率指令$Q^{*}=K_{pu}(U_N-U)+K_{iu}\int(U_N-U)dt$；其中，$K_{pu}$为无功功率调节器的比例系数，$K_{iu}$为无功功率调节器的积分系数。

[0099] 进一步地，步骤S2具体包括：获得本地电网实测频率f并根据预先设定的额定转速同步指令ω_{rN}^{*}、本地电网额定频率f_N、转速指令最大值$\omega_{r\max}^{*}$以及转速指令最小值$\omega_{r\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转速指令ω_r^{*}；转速指令ω_r^{*}的计算公式如下：

[0100] $$\omega_r^{*}=\begin{cases}\omega_{r\min}^{*} & \omega_r^{*}<\omega_{r\min}^{*}\\ K_{pf}(f-f_N)+K_{if}\int(f-f_N)dt & \omega_{r\max}^{*}>\omega_r^{*}>\omega_{r\min}^{*}\\ \omega_{r\max}^{*} & \omega_r^{*}>\omega_{r\max}^{*}\end{cases};$$

[0101] 其中，K_{pf}为转速指令调节器的比例系数，K_{if}为转速指令调节器的积分系数。

[0102] 进一步地，步骤S3具体包括：获得本地电网实测无功功率Q并接收无功功率指令Q^{*}，根据预先设定的转子无功电流指令最大值$I_{rq\max}^{*}$以及转子无功电流指令最小值$I_{rq\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转子无功电流指令I_{rq}^{*}；转子无功电流指令I_{rq}^{*}的计算公式如下：

[0103] $$I_{rq}^{*}=\begin{cases}I_{rq\min}^{*} & I_{rq}^{*}<I_{rq\min}^{*}\\ K_{pQ}(Q-Q^{*})+K_{iQ}\int(Q-Q^{*})dt & I_{rq\max}^{*}>I_{rq}^{*}>I_{rq\min}^{*}\\ I_{rq\max}^{*} & I_{rq}^{*}>I_{rq\max}^{*}\end{cases};$$

[0104] 其中，K_{pQ}为无功电流调节器的比例系数，K_{iQ}为无功电流调节器的积分系数。

[0105] 进一步地，步骤S4具体包括：获得交流励磁电机实测转速ω_r并接收转速指令ω_r^{*}，根据预先设定的转子有功电流指令最大值$I_{rd\max}^{*}$以及转子有功电流指令最小值$I_{rd\min}^{*}$，通过比例积分运算获得转子有功电流指令I_{rd}^{*}；转子有功电流指令I_{rd}^{*}的计算公式如下：

[0106] $$I_{rd}^{*}=\begin{cases}I_{rd\min}^{*} & I_{rd}^{*}<I_{rd\min}^{*}\\ K_{p\omega}(\omega_r^{*}-\omega_r)+K_{i\omega}\int(\omega_r^{*}-\omega_r)dt & I_{rd\max}^{*}>I_{rd}^{*}>I_{rd\min}^{*}\\ I_{rd\max}^{*} & I_{rd}^{*}>I_{rd\max}^{*}\end{cases};$$

[0107] 其中，$K_{p\omega}$为速度调节器的比例系数，$K_{i\omega}$为速度调节器的积分系数。

[0108] 进一步地，步骤S5具体包括如下步骤：

[0109] S501：接收转子无功电流指令I_{rq}^{*}以及转子有功电流指令I_{rd}^{*}；

[0110] S502：根据全控励磁变换器C的励磁电流容量最大值I_{max}，对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配，以获得全控励磁变换器C的实际有功电流指令I^*_{rdt}以及实际无功电流指定I^*_{rqt}；

[0111] S503：获得全控励磁变换器C的实际有功电流I_{rd}、全控励磁变换器C的实际无功电流I_{rq}、交流励磁电机B的定子有功电流I_{sd}、交流励磁电机B的定子无功电流I_{sq}以及滑差角速度ω_s；

[0112] S504：根据交流励磁电机B的励磁电感L_m以及交流励磁电机B的转子电感L_r，通过比例积分运算获得励磁电压指令的d轴分量U^*_{rd}以及励磁电压指令的q轴分量U^*_{rq}；励磁电压指令的d轴分量U^*_{rd}以及励磁电压指令的q轴分量U^*_{rq}计算公式如下：

[0113] $$\begin{cases} U^*_{rd} = K_{pi}(I^*_{rdt} - I_{rd}) + K_{ii}\int(I^*_{rdt} - I_{rd})dt + R_r I_{rd} - \omega_s(L_m I_{sq} + L_r I_{rq}) \\ U^*_{rq} = K_{pi}(I^*_{rqt} - I_{rq}) + K_{ii}\int(I^*_{rqt} - I_{rq})dt + R_r I_{rq} + \omega_s(L_m I_{sd} + L_r I_{rd}) \end{cases};$$

[0114] 其中，K_{pi}为励磁电流控制的比例系数，K_{ii}为励磁电流控制的积分系数。

[0115] 优选地，步骤S502中，对动态有功电流指令和无功电流指令进行限制与分配的方式为无功电流优先的方式，以保证交流磁力同步调相机对电网的无功功率支撑；经过限制与分配后，全控励磁变换器C的实际有功电流指令I^*_{rdt}以及实际无功电流指定I^*_{rqt}的计算公式如下：

[0116] $$\begin{cases} (I^*_{rdt} = I^*_{rd}, I^*_{rqt} = I^*_{rq}) & \sqrt{I^{*2}_{rd} + I^{*2}_{rq}} \leqslant I_{\max} \\ (I^*_{rdt} = Sgn(I^*_{rd})\sqrt{\max(I^2_{\max} - I^{*2}_{rq}, 0)}, I^*_{rqt} = I^*_{rq}) & \sqrt{I^{*2}_{rd} + I^{*2}_{rq}} > I_{\max} \end{cases};$$

[0117] 其中：

[0118] $$Sgn(I^*_{rd}) = \begin{cases} 1 & I^*_{rd} > 0 \\ 0 & I^*_{rd} = 0 \\ -1 & I^*_{rd} < 0 \end{cases}。$$

[0119] 进一步地，步骤S6具体包括如下步骤：

[0120] S601：接收直流母线直流电压指令U^*_{dc}并获得实测直流母线直流电压U_{dc}；

[0121] S602：根据网侧变换器D输出的有功电流指令最大值$I^*_{gd\max}$以及网侧变换器D输出的有功电流指令最小值$I^*_{gd\min}$，通过比例积分运算获得网侧变换器D输出的有功电流指令I^*_{gd}；网侧变换器D输出的有功电流指令I^*_{gd}的计算公式如下：

[0122] $$I^*_{gd} = \begin{cases} I^*_{gd\min} & I^*_{gd} < I^*_{gd\min} \\ K_{pV}(U_{dc} - U^*_{dc}) + K_{iV}\int(U_{dc} - U^*_{dc})dt & I^*_{gd\max} > I^*_{gd} > I^*_{gd\min} \\ I^*_{gd\max} & I^*_{gd} > I^*_{gd\max} \end{cases};$$

[0123] 其中，K_{pV}为直流电压器的比例系数，K_{iV}为直流电压器的积分系数；

[0124] S603：获得网侧变换器D输出的有功电流I_{gd}、网侧变换器D输出的无功电流I_{gq}、网侧变换器D接入点电压的d轴分量U_{gd}、网侧变换器D接入点电压的q轴分量U_{gq}以及电网电压

角速度ω_1；

[0125] S604：根据预先设定的网侧变换器D中滤波器的电阻R_g以及网侧变换器D中滤波器的电感L_g，通过比例积分运算获得网侧变换器D的控制电压指令的d轴分量U_{gd}^*以及网侧变换器D的控制电压指令的q轴分量U_{gq}^*；网侧变换器D的控制电压指令的d轴分量U_{gd}^*以及网侧变换器D的控制电压指令的q轴分量U_{gq}^*的计算公式如下：

[0126] $$\begin{cases} U_{gd}^* = K_{pig}(I_{gd}^* - I_{gd}) + K_{iig}\int (I_{gd}^* - I_{gd})dt + R_g I_{gd} + U_{gd} - \omega_1 L_g I_{gq} \\ U_{gq}^* = K_{pig}(I_{gq}^* - I_{gq}) + K_{iig}\int (I_{gq}^* - I_{gq})dt + R_g I_{gq} + U_{gq} + \omega_1 L_g I_{gd} \end{cases};$$

[0127] 其中，K_{pig}为网侧变换器D并网电流控制器的比例系数，K_{iig}为网侧变换器D并网电流控制器的积分系数。

[0128] 图3所示为本发明的一种典型应用实例，受端电网实例由馈入的直流输电、本地同步电机、负荷、传输线路与变压器构成，交流励磁同步调相机则安装于重要负荷侧通过配置其是否投入，即可对该装置的支撑效果进行验证与说明。该系统中典型的两种极端电压、频率事件为因直流输电闭锁导致的输送功率中断和因交流传输线路发生三相短路导致的系统电压、频率的整体扰动。

[0129] 在图3所示的受端电网的直流输电闭锁事件中，故障发生于3秒，输送功率的恢复发生于3.6秒，如图4所示，交流励磁同步调相机能够有效抑制负荷1、2处的频率波动；

[0130] 在图3所示的交流故障事件中，故障发生于3秒，输送功率的恢复发生于3.6秒，如图5所示，交流励磁同步调相机能够有效抑制负荷1、2处的电压、频率波动。

[0131] 结合图3～图5，本发明所提供的交流励磁同步调相机及其控制方法在典型的应用实例中，具有显著的电压、频率支撑效果。

[0132] 本领域的技术人员容易理解，以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

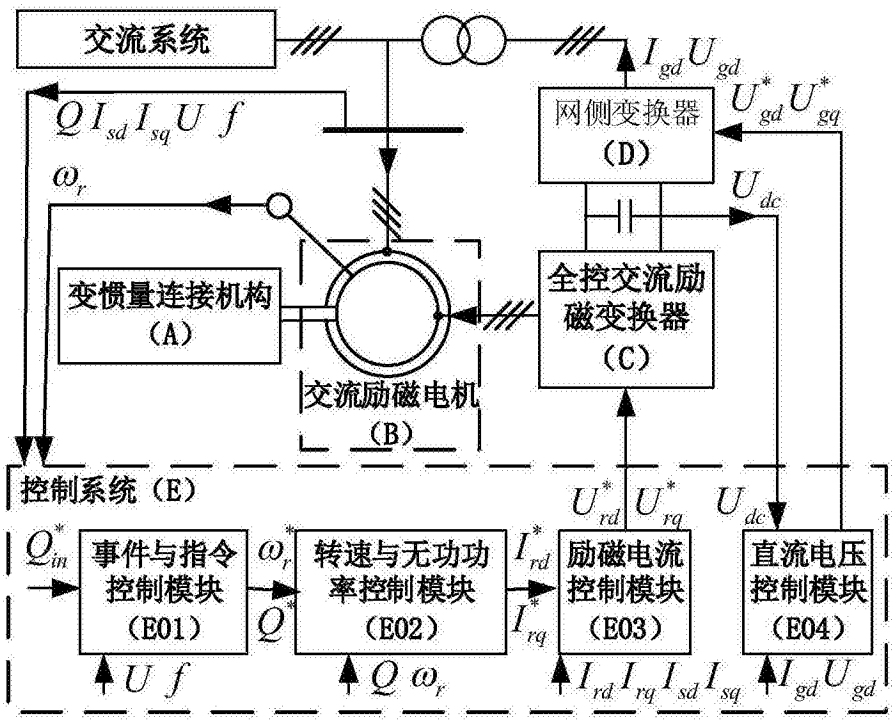

交流系统
I_{gd} U_{gd}
Q I_{sd} I_{sq} U f
网侧变换器
（D）
U^*_{gd} U^*_{gq}
ω_r
U_{dc}
变惯量连接机构
（A）
全控交流励磁变换器
（C）
交流励磁电机
（B）
控制系统（E）
U^*_{rd} U^*_{rq} U_{dc}
Q^*_{in}
事件与指令控制模块
（E01）
ω^*_r
Q^*
转速与无功功率控制模块
（E02）
I^*_{rd}
I^*_{rq}
励磁电流控制模块
（E03）
直流电压控制模块
（E04）
U f
Q ω_r
I_{rd} I_{rq} I_{sd} I_{sq}
I_{gd} U_{gd}

图1

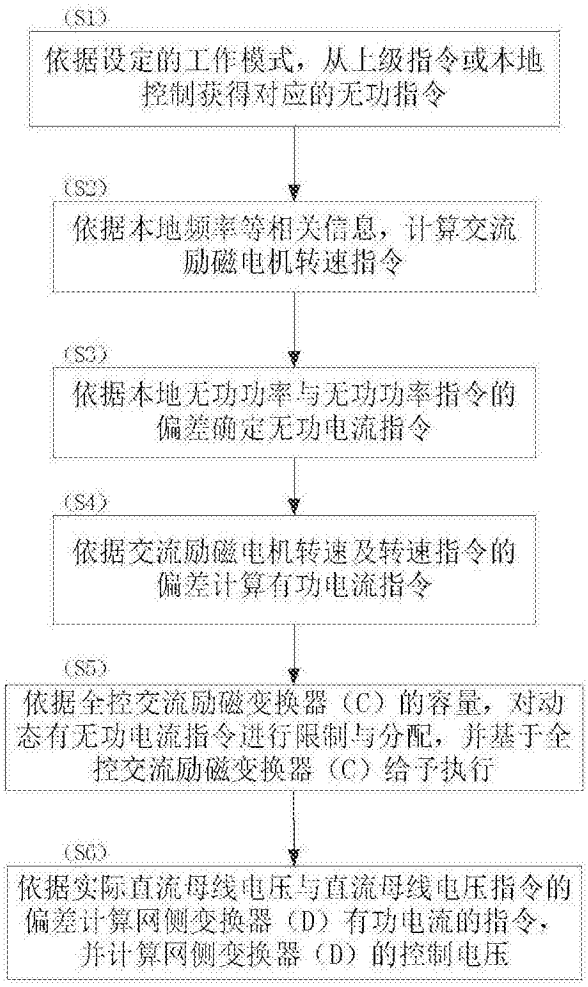

(S1)
依据设定的工作模式，从上级指令或本地控制获得对应的无功指令
(S2)
依据本地频率等相关信息，计算交流励磁电机转速指令
(S3)
依据本地无功功率与无功功率指令的偏差确定无功电流指令
(S4)
依据交流励磁电机转速及转速指令的偏差计算有功电流指令
(S5)
依据全控交流励磁变换器（C）的容量，对动态有无功电流指令进行限制与分配，并基于全控交流励磁变换器（C）给予执行
(S6)
依据实际直流母线电压与直流母线电压指令的偏差计算网侧变换器（D）有功电流的指令，并计算网侧变换器（D）的控制电压

图2

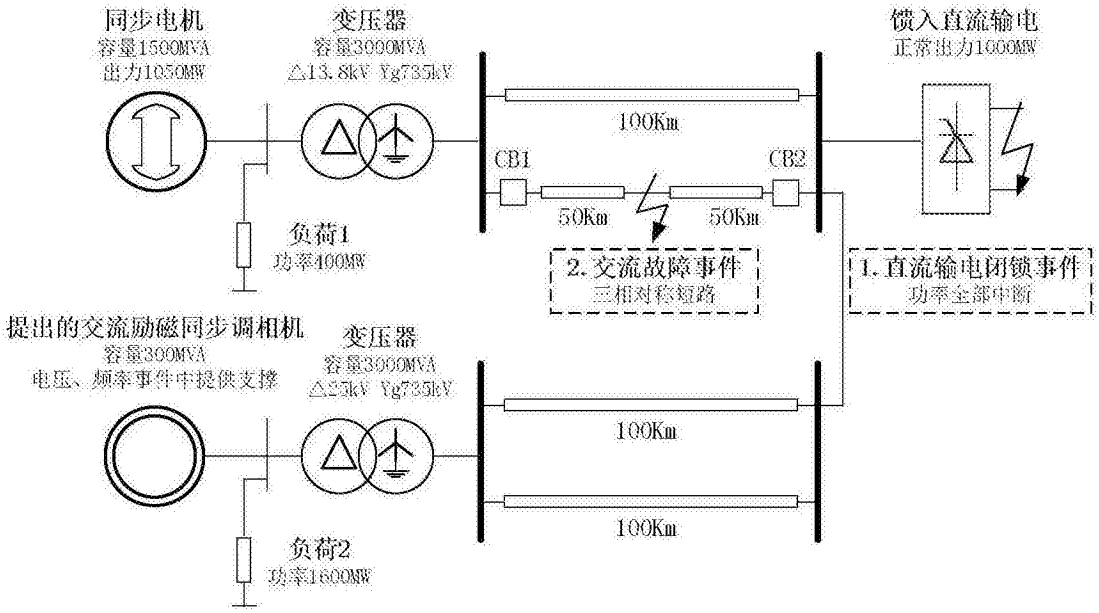

同步电机
容量1500MVA
出力1050MW
变压器
容量3000MVA
△13.8kV Yg735kV
馈入直流输电
正常出力1000MW
100Km
CB1
CB2
50Km
50Km
负荷1
功率400MW
2.交流故障事件
三相对称短路
1.直流输电闭锁事件
功率全部中断
提出的交流励磁同步调相机
容量300MVA
电压、频率事件中提供支撑
变压器
容量3000MVA
△25kV Yg735kV
100Km
100Km
负荷2
功率1600MW

图3

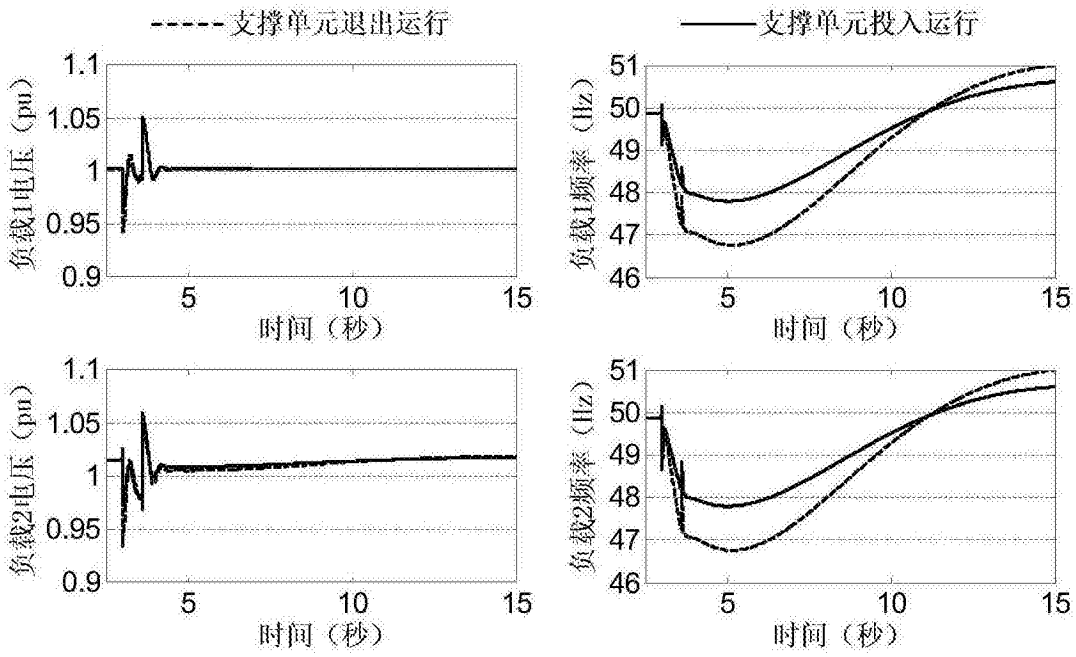

-----支撑单元退出运行
——支撑单元投入运行
负载1电压（pu）
负载2电压（pu）
负载1频率（Hz）
负载2频率（Hz）
时间（秒）

图4

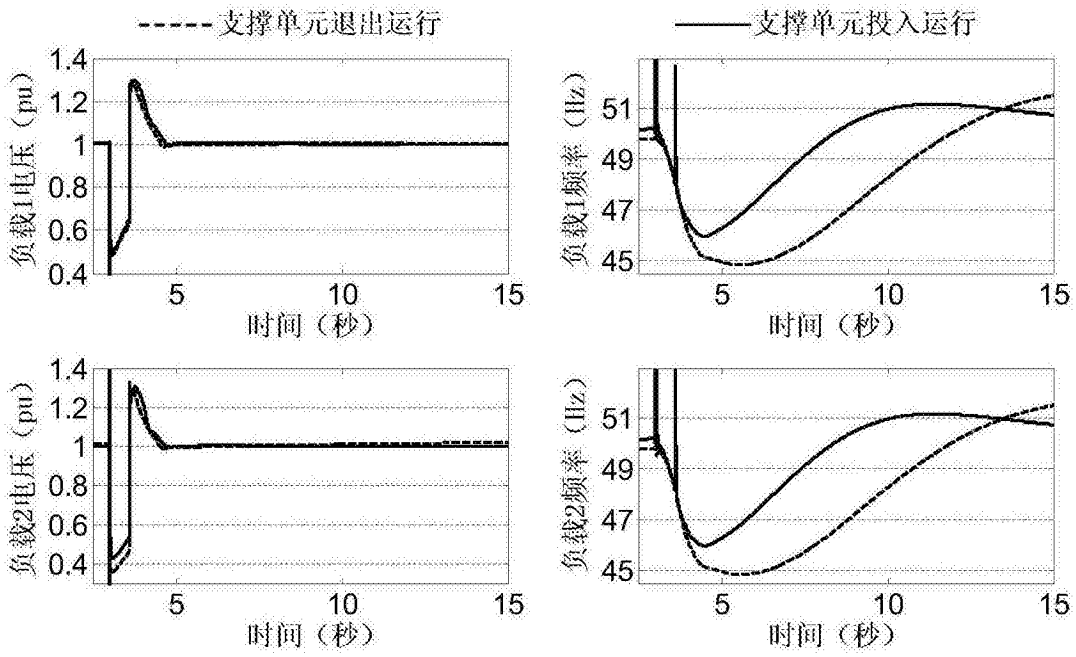

-----支撑单元退出运行
——支撑单元投入运行
负载1电压（pu）
负载2电压（pu）
负载1频率（Hz）
负载2频率（Hz）
时间（秒）

图5