

# 考虑惯量模态特征的电力系统频率性能量化方法

胡光<sup>1</sup>, 高晖胜<sup>1\*</sup>, 辛焕海<sup>1</sup>, 郑迪<sup>2</sup>, 李知艺<sup>1</sup>, 杨永恒<sup>1</sup>, 鞠平<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 中国计量大学机电工程学院, 浙江省 杭州市 310018)

## A Quantification Method for Frequency Performance of Power System Considering Modal Feature of Inertia

HU Guang<sup>1</sup>, GAO Huisheng<sup>1\*</sup>, XIN Huanhai<sup>1</sup>, ZHENG Di<sup>2</sup>, LI Zhiyi<sup>1</sup>, YANG Yongheng<sup>1</sup>, JU Ping<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** Frequency response analysis could be based on low order simplified models. Since the simplified model cannot fully represent the dynamics of the original complex model, its parameters are modal, that is, the parameters of the simplified model would vary according to the frequency response. When the system operation condition changes greatly, the parameters need to be recalculated. Currently, there are few studies evaluating the frequency performance of the system considering the modal feature of the parameters. Therefore, a frequency performance quantification method considering modal feature of the simplified model based on the unified structure model is proposed in this paper. Firstly, an adaptive correction method for unified structural parameters considering simplified parameter modal feature is proposed based on the analytical relationship between system operating conditions and unified structural parameters. Secondly, a calculation method suitable for practical systems is proposed, taking into account the effect of nonlinear control part. Finally, the effectiveness of the proposed frequency performance quantification method considering modal characteristics is verified by simulation of New England 39-bus system and a provincial power grid.

**KEY WORDS:** modal feature; unified structure simplified model; frequency performance quantification; parameter adaptive correction

**摘要:** 电力系统频率响应解析需基于低阶简化模型。由于简化模型无法完备地表征原复杂模型的动态, 故其参数具有模态性, 即参数将随系统频率响应的变化而变化, 当系统工况发生较大改变时需重新求解参数。目前, 少有文献在考虑参数模态性的情况下对系统频率响应性能进行评估。为此, 该

文基于统一结构简化模型提出考虑模态特征的频率性能量化方法。首先, 基于系统工况的变化和统一结构参数变化量之间的解析关系, 提出考虑模态特征的统一结构参数自适应修正方法。然后, 考虑非线性环节的影响, 提出适用于实际系统的计算方法。最后, 基于我国某省级电网和新英格兰39节点系统算例仿真验证所提出的考虑模态特征的频率性能量化方法的有效性。

**关键词:** 模态特征; 统一结构简化模型; 频率性能量化; 参数自适应修正

## 0 引言

随着“双碳”目标的有序推进, 我国电力系统逐步转型为含高比例新能源的新型电力系统<sup>[1-2]</sup>。大量新能源通过电力电子设备接入电网, 导致系统惯量下降、调频能力降低, 频率稳定风险突出<sup>[3-5]</sup>。因此, 量化系统的频率性能(即扰动下的频率最低点、变化率等特征)并提升发电设备的频率支撑能力, 对保证电力系统的频率安全稳定至关重要。

当前, 频率稳定分析方法大致有时域仿真法、数据驱动的人工智能法以及基于简化模型的理论分析法三类<sup>[3,6-7]</sup>。基于仿真或人工智能的方法得到的频率动态精度高, 但结论仅适应于特定的工况。基于模型的理论分析法可以建立系统频率响应和其主要影响因素的解析关系, 可进行灵敏度分析并得到一般性的结论<sup>[8]</sup>。因此, 此类方法在频率稳定分析中得到大量的应用<sup>[9]</sup>。

实际系统中的频率响应存在空间分布差异<sup>[10]</sup>, 为简化分析, 目前理论分析方法大多针对全局频率, 例如采用系统平均频率模型(average system frequency, ASF)<sup>[11]</sup>。然而, 该方法简单地将设备调

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2166204, 52107132)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (U2166204, 52107132).

频能力加和来获得系统的频率响应,理论基础并不严格。文献[12-13]在各发电设备同构的假设下,将频率响应分解为各节点相同的共模频率和多个差模频率。其中共模频率反映了系统整体频率的变化特征。文献[14]基于摄动理论提出适用于非均匀阻尼系统的频率响应近似分解方法。但摄动法的应用对系统参数有一定要求,且非均匀阻尼系统只是异构系统中的一小类。在新能源电力系统中,大量设备无法表示为惯量加阻尼的简单模型。针对此类电力系统,文献[15]提出无需同构假设的共模频率分解方法。该方法可考虑系统中网损(恒阻抗负荷)的影响,获得的频率响应比 ASF 更加准确。

虽然,相比各节点频率,全局频率更易于分析。但考虑到实际电力系统规模大、设备多样,全局频率响应仍难以解析。因此,现有系统频率研究多将设备动态模型进行统一简化建模以进行分析<sup>[5,15-21]</sup>。例如,在传统电力系统中提出的系统频率响应模型(system frequency response, SFR)模型<sup>[16]</sup>假设所有同步机均为时间常数相同的再热式汽轮机,简化后的频率响应只有二阶。电力电子发电设备动态与同步机存在较大差异,为简化分析,文献[20]将采用下垂控制的新能源设备近似为频率的阻尼,进而可与同步机阻尼合项并以分析此时的频率响应。为进一步研究电力电子设备控制中的延时等动态过程对其调频效果及频率响应的影响,文献[21]用逼近功率响应的方法将同步机、变流器等设备简化为统一结构模型,并基于此建立了刻画系统频率特征的指标集。

然而,新能源电力系统中设备动态复杂<sup>[22]</sup>,若将各种设备都用结构相同的简化模型近似,那么其参数可能无法适应各种复杂工况。即参数具有模态性,会随着系统频率响应的变化而变化。例如,在一个频率响应较为平缓的系统中,用控制中的下垂参数(阻尼)来表征变流器的调频能力也许能取得不错的效果;而当系统频率响应动态非常快时,考虑到变流器控制中的延时,这种近似的效果可能并不能令人满意,其实际的阻尼效果也许需要“打折”<sup>[21,23]</sup>。因此,为在复杂多变的工况中准确分析系统频率性能,需要深入探究设备简化模型参数的模态特征,在系统运行过程中不断更新各设备和系统的简化模型参数。

针对上述问题,本文在文献[21]的基础上进一步分析了参数的模态特征,并提出考虑模态特征的

系统频率性能量化方法。首先,建立系统运行工况、频率响应和统一结构参数之间的解析关系,提出考虑简化模型模态特征的全局参数自适应修正方法,以及仅考虑部分设备模态性的局部设备参数修正方法。这些方法揭示了系统工况对统一结构模态参数的影响机理,准确量化了设备控制环节调整对系统频率性能的提升效果,有助于提升系统频率性能分析的准确性及计算效率。进一步,将上述两种方法推广至实际系统,提出计及非线性环节的参数修正方法。最后,通过某省级电网和新英格兰 39 节点系统的仿真算例,验证了提出的参数修正方法以及频率性能量化方法的正确性和有效性。

## 1 频率性能量化基础

本节首先回顾了系统共模频率和统一结构模型,介绍统一结构模型参数的模态特性、迭代求解方法以及基于统一结构模型的频率性能量化方法。

### 1.1 频率响应分析模型

在机电电力系统中,扰动下系统频率响应可由图 1<sup>[13]</sup>表示。

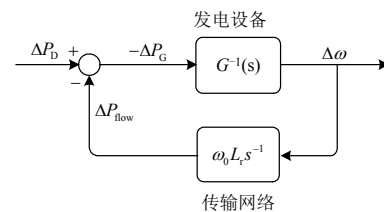


图 1 电力系统频率动态闭环框图

Fig. 1 Frequency dynamic closed-loop block diagram of power system

图 1 中  $s$  为拉普拉斯算子,  $\Delta P_D$  为各设备节点的有功扰动,  $\Delta P_D = [\Delta P_{G1} \cdots \Delta P_{Gn}]^T$  为各设备的有功响应,  $G(s) = \text{diag}\{G_i(s)\}$  为设备的频率-有功传递函数矩阵,  $\Delta \omega = [\Delta \omega_1 \cdots \Delta \omega_n]^T$  为各设备并网点频率,  $\Delta P_{\text{flow}} = [\Delta P_{\text{flow}1} \cdots \Delta P_{\text{flow}n}]^T$  为各设备节点的有功潮流,  $L_r$  为压缩拉普拉斯矩阵, 即有功-相角雅可比矩阵<sup>[24]</sup>。

对于图 1 节点频率响应,采用文献[15]提出的分解方法可从中提取系统的共模频率(可表征全局频率响应)响应,如下:

$$\Delta \omega_{\text{cm}}(s) = \frac{\Delta P_L(s)}{\sum w_i G_i(s)} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P_L(s) = w \Delta P_D(s)$  表征了系统等功率扰动;  $w = [w_1 \cdots w_n]$  为  $L_r$  矩阵的 0 特征值对应的左特征向量,反映了不同节点对系统频率响应不同的影响权

重。该式的推导过程详见文献[15]。

由(1)可知, 解析系统共模频率需对各设备传递函数求和, 会出现难以分析的高阶项。为此, 文献[21]提出形如式(2)的统一结构模型近似各类型发电设备的调频动态:

$$G_{ui}(s) = J_{ui}s + D_{ui} + \frac{1}{K_{ui}s} \quad (2)$$

式中  $J_{ui}$ 、 $D_{ui}$ 、 $K_{ui}$  分别为第  $i$  台设备统一结构模型的有效惯量系数、有效阻尼系数和有效动态调差系数。获得这些参数的方法将在后文给出。

基于统一结构模型, 将各设备传递函数叠加时仅需将它们对相应的参数求和, 而整个系统只有两阶, 如式(3)所示。

$$\Delta\omega_{cm}(s) = \frac{\Delta P_L(s)}{G_u(s)} \quad (3)$$

式中  $G_u(s) = J_u s + D_u + 1/(K_u s)$  为系统的等效统一结构模型,  $J_u = \sum w_i J_{ui}$ ,  $D_u = \sum w_i D_{ui}$  和  $1/K_u = \sum w_i / K_{ui}$ 。

值得指出的是, 虽然式(1)的推导基于设备线性的频率-有功传函数模型, 但可将其中设备动态通过微分方程表示进而实现非线性动态实用化计算。计算方法类似于在传统 ASF 模型的基础上考虑各设备的权重系数  $w_i$ 。由此非线性的设备仍可简化为统一结构模型, 具体方法可参考文献[15]。

## 1.2 频率性能量化和参数模态特征分析

将设备简化为统一结构参数本质为一个参数优化问题, 优化目标为用简化模型的功率响应逼近原复杂模型。该过程可通过求解式(4)所示超定方程实现。该式左侧为简化模型的功率响应, 而右侧为原模型的功率响应。该超定方程的最小二乘解即为设备的统一结构参数。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta\dot{\omega}_{cm}(k) & \Delta\omega_{cm}(k) & \int \Delta\omega_{cm}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} J_{ui} \\ D_{ui} \\ K_{ui}^{-1} \end{bmatrix}}_{x_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} \vdots \\ P_i(k) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{P_i} \quad (4)$$

式中:  $k=1, \dots, m$ , 其中  $m$  为观测序列的长度;  $A \in \mathbf{R}^{m \times 3}$  为共模频率微分、比例和积分组成的离散观测矩阵;  $x_i \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为待求解的第  $i$  台设备统一结构模型参数;  $P_i \in \mathbf{R}^{m \times 1}$  为第  $i$  台设备实际动态有功响应数据序列。由于获得设备在给定频率输入下的功率响应不依赖于其为线性的假设, 故该方法可同时适用于频率-有功动态为线性/非线性的设备。此外, 由于频

率安全稳定分析中重点关注系统的频率变化率和频率最低点, 因此求解该方程时只需选择从扰动开始到频率达到最低点后一段时间的数据即可, 例如, 可取  $k=m$  时为 1.5 倍最低点时刻。

由于共模频率阶数高, 难以直接代入式(4)中进行求解, 故可采用迭代法同时求解系统共模频率与设备统一结构参数, 具体方法可参考文献[21]。

基于统一结构模型, 可以建立表征系统频率最大偏移量的跌落深度系数<sup>[21]</sup>, 如式(5)所示。其物理意义为单位功率阶跃扰动下频率最大偏移量的倒数, 数值越大则系统频率性能越好:

$$\alpha = \frac{e-1}{2} D_u + \sqrt{\frac{J_u}{K_u}} \quad (5)$$

式中  $e$  为自然对数底数。

需要指出的是, 统一结构参数是在某种特定的系统工况(特定的共模频率)下进行求解的。当共模频率变化时, 求解结果也会有所不同, 即参数具有模态性。在实际电力系统中, 工况复杂多变, 系统参数具有时变特性。若每当工况发生变化均重新通过文献[21]中迭代法计算所有设备的统一结构参数, 则计算负担可能难以承受。为此, 下节提出一种考虑模态特征的统一结构参数修正方法, 可提升系统频率性能量化分析的效率。

## 2 统一结构参数修正方法

本节首先分析并建立了系统工况变化量和系统统一结构参数变化量的关系, 据此提出一种考虑模态特征的统一结构参数自适应修正方法。其次针对系统工况变化较小的情况, 提出少量设备控制改变对系统频率性能影响程度的量化方法。并将上述两种方法推广至实际系统, 提出计及非线性环节的参数修正方法。

### 2.1 系统运行点与频率响应的对应关系

在对系统工况变化分析前, 选取某运行方式作为标称运行方式, 在该运行方式下的系统称为标称系统。当关注频率-有功动态时, 系统的运行方式与扰动下的共模频率存在映上但非一对一的关系。且系统的共模频率与统一结构参数之间存在映上且一对一的关系。由此, 可根据统一结构模型参数建立起系统运行点和频率响应间的关系。以图 2 所示系统运行方式变化为例进行说明。在两种运行方式下, 系统受到相同的扰动时共模频率有所不同, 这两种运行方式可由对应的统一结构参数进行表

征,如图2中右侧红、蓝两点所示。

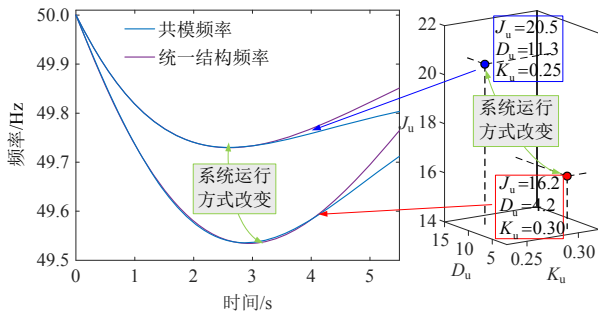


图2 系统运行点与频率轨迹的关系

Fig. 2 Relationship between system operation points and frequency trajectories

系统运行点的变动根源在于系统中设备的变化,这可用模型  $G(s)$  的摄动  $\Delta G(s)=\text{diag}\{\Delta G_i(s)\}$  表示。当系统中部分设备发生摄动后,由于统一结构参数的模态性,即使没有变化的设备,其标称统一结构模型  $G_{ui}=J_{ui}0s+D_{ui}0+1/(K_{ui}0s)$  (基于原运行点获得)也可能无法衡量在新运行点处的调频特性,基于原统一结构参数分析系统频率性能将出现误差。因此,需要建立设备模型摄动量、系统共模频率变化量以及设备统一结构参数变化量之间的关系,进而提出统一结构参数的自适应修正方法。

## 2.2 统一结构参数自适应修正方法

为建立上述变量之间的解析关系,对求解统一结构参数的式(4)进行摄动:

$$(A + \Delta A)(x_i + \Delta x_i) = (P_i + \Delta P_i) \quad (6)$$

式中:  $\Delta A$  和  $\Delta P_i$  分别为系统共模频率变化后观测数据的变化量矩阵和设备有功功率响应变化量序列;  $\Delta x_i = [\Delta J_{ui} \quad \Delta D_{ui} \quad 1/\Delta K_{ui}]^T$  为设备  $i$  的统一结构参数变化量。

将式(4)带入式(6)并忽略二阶小量,得到:

$$\Delta A x_i + A \Delta x_i = \Delta P_i \quad (7)$$

式中: 数据序列  $\Delta A x_i$  和  $\Delta P_i$  可由  $\Delta A(s)x_i$  ( $\Delta A(s)$  为  $1 \times 3$  维传递函数矩阵) 和  $\Delta P_i(s)$  经反拉氏变换得到;  $\Delta A(s)x_i$  和  $\Delta P_i(s)$  可由设备(系统)的统一结构参数变化量  $\Delta x_i$  ( $\Delta x_u$ ) 和设备模型的摄动量  $\Delta G_i(s)$  表示,分别如式(8)和(9)所示,  $\Delta x_u$  为所有设备变化量  $\Delta x_i$  的加权和;  $K_{Ai}(s)$ 、 $K_{Bi}(s)$ 、 $\omega_{cm0}(s)$  等变量的含义以及这两个公式的推导过程参考附录 A。

$$\Delta A(s)x_i = K_{Ai}(s)\Delta x_u \quad (8)$$

$$\Delta P_i(s) = K_{Bi}(s)\Delta x_u + \omega_{cm0}(s)\Delta G_i(s) \quad (9)$$

由式(8)和(9)获得  $\Delta A x_i$  和  $\Delta P_i$  并代入式(7),进而可得到设备模型摄动量和统一结构参数模型变化

量之间的关系:

$$(K_{Ai} - K_{Bi})\Delta x_u + A\Delta x_i = c_i \quad (10)$$

式中  $c_i = L^{-1}[\omega_{cm0}(s)\Delta G_i(s)]$ , 由设备模型的变化量决定。

对所有设备都建立式(10)所示方程,并将它们加权求和,可得如式(11)所示的系统统一结构参数修正方程。该式给出系统统一结构参数变化量  $\Delta x_u$  和各设备摄动量  $c_i$  间的显式关系。

$$[\sum w_i(K_{Ai} - K_{Bi}) + A]\Delta x_u = \sum w_i c_i \quad (11)$$

求解式(11)对应的法方程组,即可得到满足式(7)残差最小的系统统一结构参数变化向量  $\Delta x_u$ ,回带至式(10)即可求解得到各设备参数的变化量。

关于以上修正方法有几点说明:

1) 式(10)、(11)所示修正方程中,所需矩阵  $A$ 、 $K_{Ai}$ 、 $K_{Bi}$  以及  $c_i$  仅与系统标称运行点处的共模频率和各设备统一结构参数、以及设备模型摄动量相关。对于已用统一结构进行表示的运行点,这些数据容易获得。与迭代方法相比,所提自适应修正方法不需要重复迭代,直接给出了设备和系统统一结构参数与设备摄动量之间的关系,在大系统分析中可极大减少计算量。

2) 设备传递函数的摄动不仅可用于表示模型、参数的变化,也可分析设备并离网的影响。具体的,模型为  $G_0(s)$  的设备并/离网时,设备模型的摄动量为  $\Delta G(s)=\pm\Delta G_0(s)$ 。

3) 所提方法基于一阶灵敏度信息,给出了系统工况(共模频率)变化时统一结构模态参数的变化情况。然而,由于目前缺乏对于模态性的量化描述方法(即模态参数有多适合于目前的工况,或工况变化多大时这些参数就不适用了),故较难给出参数自适应修正算法的适用边界。不过,这并不妨碍该参数修正方法的应用,只需与迭代法配合即可,可参考附录 B。

## 2.3 设备频率支撑对系统性能影响的量化分析

2.2 节中方法可用于在工况变化较大时修正系统的统一结构参数。在仅考虑少量设备发生变化时(投入/切出,或调节其虚拟惯量/下垂等参数等),由于系统运行点变化较小,可近似认为未发生变化的设备统一结构参数变化不大,进而可将前述修正方法进行简化。

具体地,考虑系统中某台设备(设为第  $i$  台)发生变化,则系统统一结构参数变化量与该设备加权

后的参数变化量近似相同,即 $\Delta \mathbf{x}_u = w_i \Delta \mathbf{x}_i$ 。代入式(11)可得修正方程:

$$(\mathbf{K}_{A_i} - \mathbf{K}_{b_i} + w_i^{-1} \mathbf{A}) \Delta \mathbf{x}_u = \mathbf{c}_i \quad (12)$$

式(12)建立了某台设备的调频控制变化量(由  $\mathbf{c}_i$  表示)与系统统一结构参数变化量 $\Delta \mathbf{x}_u$ 之间的关系,可用于修正因局部设备变化而改变的系统统一结构参数,即量化对系统频率性能的影响程度。需要强调的是,设备调频控制中的虚拟惯量或下垂等参数无法做到这一点,它们并不等同于真实的惯量或阻尼。

式(10)、(11)与式(12)都是参数自适应修正方法。为便于区分,后文将 2.2 节中方法称为全局修正方法,而将本节所提方法称为局部修正方法。

### 2.4 计及非线性环节的参数修正方法

2.2、2.3 节中参数自适应修正方法的推导过程依赖于线性的模型,而实际系统中发电设备存在大量非线性环节(调速器死区、限幅等)。为在考虑非线性环节的同时进行分析,可对前述参数修正方法进行改进。

首先,对于 2.3 节考虑的局部设备发生变化的情况,可根据原运行点信息计算发生变化设备的统一结构参数,并据此对系统参数进行修正。该方法与 2.3 节式(12)的区别在于,后者计算变化设备的统一结构参数时所采用的运行点(共模频率)并不是原运行点,而考虑这些设备发生变化后带来的影响。

为了分析工况变化较大的情况,可将 2.2 节方法进行调整为如图 3 所示的参数修正流程。该流程对系统统一结构参数进行了 3 次修正。首先,由于切出的设备不再响应频率波动,故可将系统统一结构参数中切出设备的参数变为 0,进而计算一个新的运行点。然后,基于该运行点(共模频率),计算新投入设备的统一结构参数,进而又可更新系统运行点。最后,利用新的运行点对其余机组(原系统中切出部分设备后所剩余的机组)进行修正,进而近似得到此时系统中所有设备的统一结构参数,并可计算共模频率。上述计算方法本质上一种逐步逼近系统在新运行点处的实用化计算方法,可在系统运行方式变化较大的情况对统一结构参数进行较为精确地修正。

还值得指出的是,广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)可以实时监测全网机组启停情况、设备端口信息等电网运行数据<sup>[25]</sup>。测量的数据还可用于辨识设备的模型<sup>[22-28]</sup>。这些技术

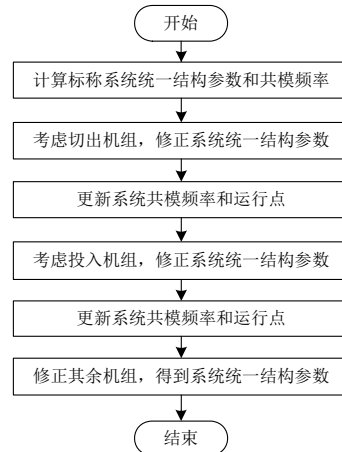


图 3 工况变化较大时考虑非线性环节的参数修正方法

Fig. 3 Parameter correction method considering nonlinear when operation mode vary greatly

为本文方法在实际系统中的应用提供了保障。

## 3 算例分析

本节首先在新英格兰 39 节点系统中验证了统一结构参数全局自适应修正方法,并量化分析了设备频率支撑对系统频率性能的影响。其次,基于我国某省级电网算例,验证了计及非线性环节的参数修正方法和频率性能量化方法可应用于实际电网。

### 3.1 新英格兰 39 节点系统

在 MATLAB/Simulink 中搭建新英格兰 39 节点系统模型,并将标准系统中部分同步机替换为变流器,如表 1 所示。其中  $J$ 、 $D$  为同步机(变流器)的惯量与阻尼(虚拟惯量与下垂系数), $K$  为同步机一次调频增益。为分析控制中延迟的影响,跟网型变流器中,虚拟惯量和下垂得到功率参考值经过了一个时间常数为 2s 的滤波环节,如附图 C1 所示。其余设备的控制框图和参数可参考文献<sup>[15]</sup>。

表 1 新英格兰 39 节点系统中各设备信息

Table 1 Equipment information of new engl and power system

设备名	设备类型	主要参数/pu
G1 G4 G6 G10	同步机	$J=8, D=0, K=20$
G2 G3 G5 G7	跟网型变流器	$J=5, D=2$
G8 G9	虚拟同步机	$J=8, D=20$

选取系统基准容量为 1000MVA,将负荷设置为恒阻抗负荷,按文献<sup>[15]</sup>方法计算各设备权重系数,如表 2 所示。

将上述系统选取为标称系统,考虑 600MW 有功缺额扰动,在 MATLAB 仿真得到各设备频率轨迹,并将该轨迹与基于各设备传递函数(参考文献<sup>[15]</sup>)得到的共模频率、以及基于统一结构简化的

表2 权重系数  
Table 2 Weighting coefficients

系数	值	系数	值
w1	0.9798	w6	1.0033
w2	0.99	w7	1.0031
w3	0.9905	w8	1.033
w4	1.0062	w9	1.0116
w5	1.0044	w10	0.9769

轨迹进行对比,如图4所示。由图可知,系统共模频率可以很好地表征系统中各节点频率的整体变化趋势,且根据统一结构模型得到的频率轨迹和共模频率在扰动后约5s内基本一致。这说明可以基于统一结构模型量化分析系统的频率性能。

为说明具有延迟的虚拟惯量/下垂不是真正的惯量与阻尼,将跟网型变流器传递函数(参考附录C式(C1))用  $G(s)=Js+D$  近似并计算共模频率,与准确的共模频率及其统一结构近似进行对比,如图5所示。由图可知,相较于将虚拟惯量加下垂直接简化

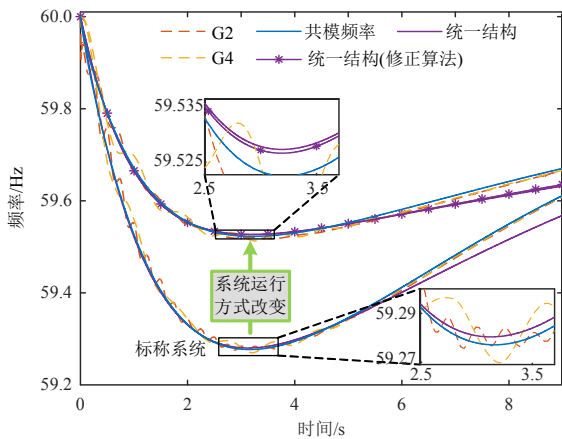


图4 新英格兰系统频率轨迹  
Fig. 4 Frequency trajectories of New England power system

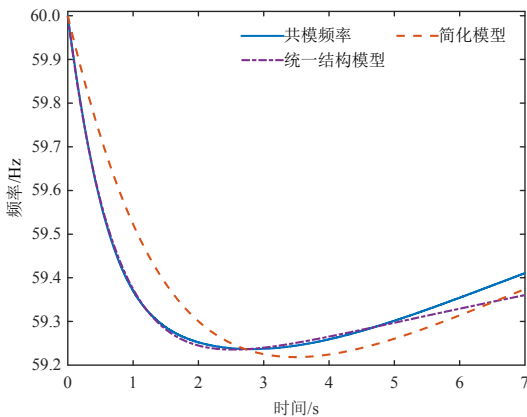


图5 不同新能源设备分析模型所得系统的频率轨迹对比  
Fig. 5 Comparison of frequency obtained from different new energy equipment analysis models

为惯量加阻尼,本文考虑模态性的模型简化方法可更准确地衡量系统频率响应。

接下来,验证第2节中考虑模态特征的统一结构参数修正方法。将跟网型变流器的  $J$  变为原来的1.5倍,同时将虚拟同步机  $J$  和  $D$  变为原来的2倍。表3对比了新的运行方式中,通过迭代法以及2.2节中自适应修正方法获得的系统统一结构参数,其中计算相对误差时以迭代法所得参数为基准。此外,图4对比了根据这两种方法所得频率轨迹。由此可知,根据所提修正方法所得统一结构参数与准确值(迭代法)相对误差小于5%,可以准确表征新运行点处的频率响应。

表3 系统统一结构参数及修正误差  
Table 3 Unified structural parameters of new england power system and errors of correction method

统一结构参数/pu	原标称系统	运行方式改变系统		相对误差/%
		多次迭代	修正方法	
$J_u$	50.22	65.51	65.98	0.72
$D_u$	39.75	66.45	66.11	0.51
$1/K_u$	4.02	3.33	3.45	0.60

接下来,采用2.3节局部修正方法分析设备调频控制对系统频率性能的影响。将跟网型变流器的虚拟惯量和下垂等参数,对系统有效惯量和有效阻尼的影响如表4所示。由表可知,直接根据这些参数的调整量化系统频率性能的提升程度可能产生误差,在频率性能期望量化结果为增加有效惯量时,相较于附加控制环节,直接整定系统的虚拟惯量控制环节的参数无法根据系统的需要准确提升系统的有效惯量或有效阻尼;在控制目标为增加有效阻尼时,直接调整参数还会导致有效惯量的显著减少,给系统频率性能带来不利影响。

表4 统一结构参数变化量  
Table 4 Unified structure parameters variation

频率性能期望量化结果/pu		调节控制参数结果/pu	
系统有效惯量变化	系统有效阻尼变化	系统有效惯量变化	系统有效阻尼变化
6	0	4.1297	1.7068
0	6	-0.6717	5.7319

### 3.2 省级电网算例

考虑某省级电网2021年10月大/小两种运行方式。其中,选取大运行方式作为标称系统,用于验证统一结构模型在实际系统中的适用性。通过将大/小运行方式进行切换来验证所提计及非线性环节的参数修正方法的有效性。该电网大小两种运行方

式中主要参数如表 5 所示，取基准容量为 100MVA。为了便于分析，设置系统负荷均为恒功率负荷。

表 5 某省级电网运行参数

Table 5 Operation parameters of a provincial power grid

系统运行方式	系统运行发电设备数	系统发电容量/MVA
小方式	683	48366.26
大方式	795	77947.79

在 MATLAB 中建立该系统中所有发电设备频率-有功响应的非线性微分方程模型，并通过迭代算法计算得到系统大运行方式下的统一结构模型标幺值参数为  $J_u=8414.5$ 、 $D_u=-1332.1$ 、 $1/K_u=732.8$ 。考虑 500MW 有功功率缺额扰动，在 PSD-BPA 平台中进行仿真，并将仿真得到的 4 个节点的频率轨迹与共模频率(结合所有设备的微分方程模型进行计算)以及基于统一结构近似得到轨迹进行对比，如图 6 所示。由图可知，系统的共模频率可以很好的表征系统的频率变化趋势，且统一结构模型得到的最低点等频率特征与 BPA 仿真结果也基本一致。

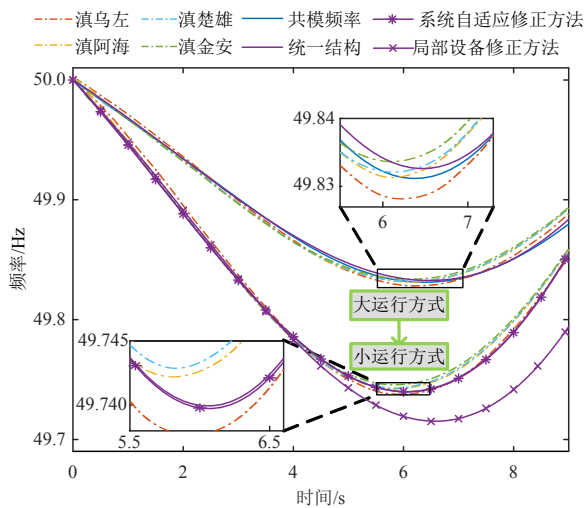


图 6 省级电网频率轨迹对比

Fig. 6 Frequency comparison of a provincial power system

表 6 给出各节点频率最低点的仿真结果、基于统一结构模型的计算结果以及它们之间的相对误差(以仿真结果为基准值进行计算)。由表可知，所有相对误差小于 5%，验证了统一结构模型可适用于实际大规模系统。

接下来验证计及非线性环节的参数自适应修正方法。在该电网由大方式(标称运行方式)转换为小方式时，应用 2.4 节中全局/局部修正方法对系统统一结构参数进行修正，并同时采用迭代法进行分析。这几种方法获得的统一结构参数以及频率轨迹分别如表 7、图 6 所示。可以看出，在工况发生较

表 6 小运行方式下各观测点频率特征和统一结构模型频率特征的误差

Table 6 Frequency characteristic error of each observation point and the unified structure model under small operation mode

观测点	最低点		
	仿真结果/Hz	理论结果/Hz	相对误差/%
滇乌左	-0.1718	-0.1674	2.56
滇阿海	-0.1687	-0.1674	0.77
滇楚雄	-0.1679	-0.1674	0.30
滇金安	-0.1663	-0.1674	0.66

表 7 运行方式切换下修正结果与迭代结果的对比

Table 7 Comparison of modified results and iterative results under operation mode switching

统一结构参数/pu	原标称系数(大方式)	变更后系统(小方式)			相对误差/%	
		局部修正	全局修正	多次迭代(基准)	局部修正	修正方法
$J_u$	8414.5	5141.2	4881.4	4879.3	5.32	0.04
$D_u$	-1332.1	-846.9	-720.8	-720.5	17.49	0.04
$1/K_u$	732.8	443.3	462.8	463.4	4.21	0.13

大变化时，相比于局部修正，全局修正法所得结果统一结构参数以及获得的频率轨迹均更准确。此外，在同一台计算机中(i7 处理器，16GB 内存)，根据参数自适应修正方法获得统一结构参数需要 90.98s，而多次迭代计算至同样精度需要 270.63s。可见所提方法减少了计算量，能在实际电网分析中加快参数的更新速度。

为说明考虑非线性环节的局部设备修正方法的适用场景，在前述小运行方式的基础上切出滇乌右发电机组 8 和 9 这两台机。图 7 给出了迭代法和局部设备修正法得到的频率轨迹。这两种方法所得频率轨迹基本一致，而局部设备修正法计算仅需 0.041s。由此可见，对于系统工况变化较小的情况，

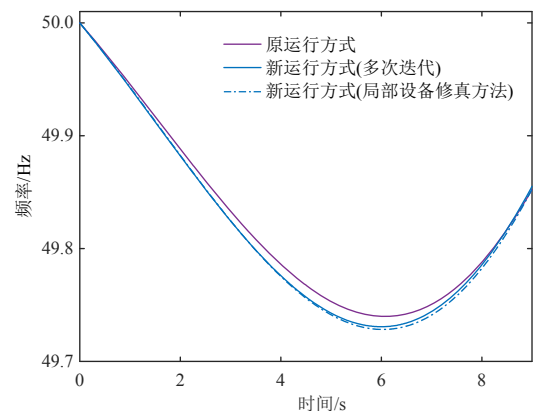


图 7 局部设备变化情况时各种方法获得频率轨迹对比

Fig. 7 Various methods are used to obtain frequency trajectory comparisons when local equipment changes

仅对发生变化的设备进行修正即可满足工程精度的需求,且运算速度远快于数值仿真。

需要指出的是,上述算例中使用的计算程序主要是用于验证本文所提理论方法的有效性,相较于商用软件,尚未太注重效率。通过将迭代法、全局自适应修正法以及局部设备修正法合理配合,可实现电力系统频率性能的在线监测。具体可参考附表 B1,其中归纳总结了上述各方法的特性以及适用场景。

结合以上算例分析可知,所提参数修正方法可用于在实际系统中修正设备的统一结构参数,实现电力系统频率性能的量化评估。

## 4 结论

本文提出一种考虑参数模态特征的电力系统频率性能量化方法,主要结论如下:

1) 所提参数修正方法建立了系统工况变化与统一结构模态参数变化之间的解析关系,提升了对简化模型中参数模态特征的认识水平。

2) 所提修正方法分为全局修正与局部修正两种层面,均可推广至具有死区、限幅等大量非线性环节的实际电力系统。相比于迭代法,所提修正方法(特别是局部修正)计算速度更快。通过将几种方法配合,可实现实际系统频率性能的在线评估。如何量化参数模态性的强弱并分析所提参数修正方法的适用边界,是未来的工作之一。

## 参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [2] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4627-4636.  
MA Weiming. Thoughts on the development of frontier technology in electrical engineering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4627-4636 (in Chinese).
- [3] 张子扬,张宁,杜尔顺,等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-24.  
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-24(in Chinese).
- [4] 贺海磊,张彦涛,孙晓强,等. 考虑频率安全约束的西北电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4753-4762.  
HE Hailei, ZHANG Yantao, SUN Xiaoqiang, et al. Evaluation method of renewable energy development scale and DC transmission scale of china northwest power grid by considering frequency security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4753-4762(in Chinese).
- [5] JU Ping, ZHENG Yi, JIN Yuqing, et al. Analytic assessment of the power system frequency security[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(15): 2215-2225.
- [6] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222(in Chinese).
- [7] 张程铭,柳璐,程浩忠,等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-264.  
ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-264(in Chinese).
- [8] 李洪宇,鞠平,余一平,等. 随机激励下系统频率动态安全性量化评估及半解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1955-1962.  
LI Hongyu, JU Ping, YU Yiping, et al. Quantitative assessment and semi-analytical analysis for system frequency dynamic security under stochastic excitation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1955-1962(in Chinese).
- [9] 鞠平,秦川,罗建裕,等. 现代电力系统频率安全分析与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
JU Ping, QIN Chuan, LUO Jianyu, et al. Frequency security analysis and control of modern power systems [M]. Beijing: Science Press, 2021(in Chinese).
- [10] MILANO F, ORTEGA A. Frequency divider[C]// Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago: IEEE, 2017: 1.
- [11] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on



- Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.
- [12] GAO Huisheng, YUAN Hui, XIN Huanhai, et al. Nodal frequency performance of power networks[C]// Proceedings of the 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection(APAP). Xi'an: IEEE, 2019: 1838-1842.
- [13] PAGANINI F, MALLADA E. Global analysis of synchronization performance for power systems: bridging the theory-practice gap[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(7): 3007-3022.
- [14] PAGNIER L, JACQUOD P. Optimal placement of inertia and primary control: a matrix perturbation theory approach[J]. IEEE Access, 2019, 7: 145889-145900.
- [15] GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Common-mode frequency in converter-integrated power systems: definition, analysis, and quantitative evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4846-4860.
- [16] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [17] GUGGILAM S S, ZHAO Changhong, DALL' ANESE E, et al. Optimizing DER participation in inertial and primary-frequency response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5194-5205.
- [18] 刘柳, 李卫东, 唱友义, 等. 大功率缺失下频率最低点估计的低阶仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 78-83.
- LIU Liu, LI Weidong, CHANG Youyi, et al. Low-order simulation model for frequency nadir estimation with high power deficit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 78-83(in Chinese).
- [19] HUANG Hui, JU Ping, JIN Yuqing, et al. Generic system frequency response model for power grids with different generations[J]. IEEE Access, 2020, 8: 14314-14321.
- [20] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3506.
- ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3506(in Chinese).
- [21] 高晖胜, 辛焕海, 黄林彬, 等. 新能源电力系统的共模频率分析及其特征量化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 890-899.
- GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Characteristic analysis and quantification of common mode frequency in power systems with high penetration of renewable resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 890-899(in Chinese).
- [22] LI Hongyu, JU Ping, GAN Chun, et al. Analytic analysis for dynamic system frequency in power systems under uncertain variability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 982-993.
- [23] D' ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based MicroGrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 394-395.
- [24] DORFLER F, BULLO F. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(1): 150-163.
- [25] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
- CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153(in Chinese).
- [26] 鞠平. 现代电力系统控制与辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [27] 李振垚. 基于广域测量系统的新能源发电系统参数在线辨识方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- LI Zhenyao. Research on online parameter identification of renewable energy generation system based on wide area measurement system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021(in Chinese).
- [28] AMINIFAR F, FOTUHI-FIRUZABAD M, SAFDARIAN A, et al. Synchrophasor measurement technology in power systems: panorama and state-of-the-art[J]. IEEE Access, 2014, 2: 1607-1628.
- [29] 徐筱倩, 黄林彬, 汪震, 等. 双馈风电机组虚拟惯量控制对电力系统机电振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 11-17, 43.
- XU Xiaoqian, HUANG Linbin, WANG Zhen, et al. Analysis on impact of virtual inertia control of DFIG-based wind turbine on electromechanical oscillation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 11-17, 43(in Chinese).

#### 附录 A 参数自适应修正方法推导

为推导得到式(10), 先在频域进行分析, 再转化到时域。首先分析系统共模频率变化量 $\delta\omega_{cm}$ 。将标称系统的共模频率记为 $\omega_{cm0}$ , 设备摄动导致的共模频率变化量记为 $\delta\omega_{cm}$ , 则系统共模频率变化量可由一阶灵敏度函数表示为

$$\delta\omega_{cm}(s)=[\rho_j(s) \quad \rho_D(s) \quad \rho_K(s)]\Delta\mathbf{x}_u \quad (A1)$$

式中  $\rho_j(s)=\partial\omega_{cm}(s)/\partial J_u$ ,  $\rho_D(s)=\partial\omega_{cm}(s)/\partial D_u$ ,  $\rho_K(s)=\partial\omega_{cm}(s)/\partial K_u$  依次为表征共模频率对系统模型参数  $J_u$ 、 $D_u$  和  $K_u$  的一阶灵敏度函数。

其次分析 $\Delta\mathbf{A}x_i$  项。 $\Delta\mathbf{A}$  的频域表达式为 $\Delta\mathbf{A}(s)=[s\delta\omega_{cm}(s)$

$\delta\omega_{cm}(s) \delta\omega_{cm}(s)/s]$ ，结合式(A1)，可将 $\Delta A(s)x_i$ 整理为

$$\Delta A(s)x_i = K_{A_i}(s)\Delta x_u \tag{A2}$$

式中  $K_{A_i}(s) = G_{ui}(s)[\rho_J(s) \rho_D(s) \rho_K(s)]$  为系数向量。

其次分析各设备有功功率响应的变化量，即 $\Delta P_i$ 项。系统中各设备的有功响应变化原因可分为两种：1) 摄动导致的设备模型发生变化；2) 共模频率变化导致的设备模型输入量发生变化。第  $i$  台设备有功功率响应变化量的  $s$  域表达式可表示为

$$\Delta P_i(s) = \Delta P_{i1}(s) + \Delta P_{i2}(s) \tag{A3}$$

式中： $\Delta P_{i1}(s) = \omega_{cm0}(s)\Delta G_i(s)$  为设备摄动  $\Delta G_i(s)$  引起的有功功率响应变化量，如果该设备未发生摄动，则  $\Delta G_i(s) = 0$ ； $\Delta P_{i2}(s) = G_i(s)\delta\omega_{cm}(s)$  为设备共模频率输入变化引起的有功功率变化量。式(A3)中 $\Delta P_i(s)$ 的拉普拉斯逆变换即为式(7)中第  $i$  台设备功率响应变化量的时域序列 $\Delta P_i$ 。

结合共模频率变化量表达式(A1)，式(A3)可整理为：

$$\Delta P_i(s) = K_{b_i}(s)\Delta x_u + \omega_{cm0}(s)\Delta g_i(s) \tag{A4}$$

式中  $K_{b_i}(s) = G_i(s)[\rho_J(s) \rho_D(s) \rho_K(s)]$  为映射向量，将  $\omega_{cm0}(s)\Delta G_i(s)$  记为  $c_i(s)$ 。

将式(A2)和(A4)进行拉普拉斯逆变换，并带入式(7)，可得式(10)所示的第  $i$  台设备统一结构参数的修正方程。

附录 B 各方法特性及应用场景比较

表 B1 各方法特性及应用场景比较

Table B1 Comparison of different methods

方法	准确度	计算速度	适用场景
多次迭代	高	慢	应用于定期校正设备统一结构参数，可避免长期应用修正方法导致的累计误差。
自适应修正	高	(目前)较慢	应用于工况变化较大的场景，例如运行方式切换。
修正方法	局部中等	非常快	应用于局部设备变化的场景。可实时量化评估系统有效惯量和频率性能。

附录 C 算例中所用跟网型变流器控制模型

文中跟网型变流器频率-有功传递函数  $G_{VSC}(s)$ 为：

$$G_{VSC}(s) = G_{PLL}(s)G_{VIC}(s)G_{LOOP}(s) \tag{C1}$$

式中： $G_{PLL}(s)$ 为设备锁相环传递函数； $G_{VIC}(s)$ 为频率-有功参考值传递函数； $G_{LOOP}(s)$ 为内环和外环传递函数，具体表达式可参考文献[29]。

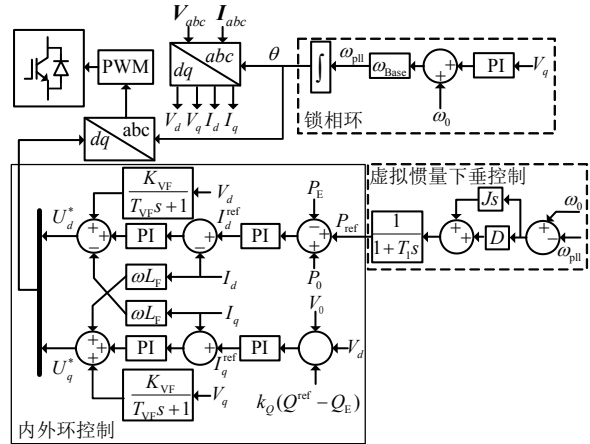


图 C1 算例中跟网型变流器控制框图

Fig. C1 Control block diagram of the grid-following converter



胡光

在线出版日期：2023-03-10。

收稿日期：2022-06-07。

作者简介：

胡光(1999)，男，博士研究生，主要研究方向为电力系统频率稳定分析与控制等，huguang@zju.edu.cn；

\*通信作者：高晖胜(1995)，男，博士后，主要研究方向为电力系统频率稳定分析与控制等，gaohuisheng@zju.edu.cn；

辛焕海(1981)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制、新能源和微电网技术等，xinhh@zju.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)