

基于移频理论的多模式 VBR 异步电机仿真建模

刘科研¹ 贾东梨¹ 姜铭渝² 夏越² 杜松怀²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为满足对异步电机暂稳态过程准确、快速仿真的需要,提出了一种基于移频理论的多模式 voltage-behind-reactance (VBR)异步电机仿真模型。首先,基于希尔伯特变换,将电气信号转换为相应的解析信号;其次,进一步引入移频变换技术,分别构建多尺度 VBR 与近似 VBR 异步电机移频仿真模型。最后,通过不同的移动频率和不同的 VBR 模型之间的切换,实现准确、高效的多时间尺度暂态和稳态过程仿真。当移动频率等于零时,该模型与传统电磁暂态近似 VBR 电机模型等价,可刻画高频暂态过程,且电机模型具有恒定阻抗矩阵,大幅度提升了仿真效率;当移动频率等于系统基波频率时,采用多尺度 VBR 移频暂态模型,模型可使用大步长仿真,获得低频暂态和稳态的包络曲线。仿真结果表明,所提出的模型可实现准确和高效的异步电机多时间尺度暂态与稳态仿真。

关键词: 异步电机; 多模式; 移频理论; 仿真模型

中图分类号: TM343+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0360-07

Multi-mode VBR Induction Machine Model Based on Frequency Shifting Theory

LIU Keyan¹ JIA Dongli¹ JIANG Mingyu² XIA Yue² DU Songhuai²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To achieve high efficiency and accuracy of simulation, a multi-mode voltage-behind-reactance (MVBR) induction machine model was proposed based on frequency shifting theory. At first, the analytic signals were constructed by using Hilbert transform. Frequency shifting was performed, and multi-scale VBR and approximate VBR (AVBR) models were developed. Meanwhile, shift frequency was introduced as a novel parameter in the proposed MVBR model. By appropriate selection of shift frequencies, accurate and efficient multi-scale transients simulation was supported. When the shift frequency was set to be zero, MVBR model performed in the same way as AVBR model. In this mode, high-frequency transients were simulated accurately with small time-step sizes. The conductance matrix of machine model remained constant, thereby contributing to improvement in simulation efficiency. When the shift frequency equaled the carrier frequency, multi-scale VBR model was selected. Large time-step sizes can be used in the simulation of low-frequency transients and steady-state. The test case demonstrated the effectiveness of the proposed machine model in terms of accuracy and efficiency.

Key words: induction machine; multi-mode; frequency shifting theory; simulation model

0 引言

农业、工业与电力能源行业的诸多负载均靠异步电机拖动,譬如农业生产中常用的育苗机^[1]、农场用的载货电梯^[2]以及农业、工业建设中常用的挖

掘机^[3]等。此外,在公共信息模型(Common information model,CIM)的建模仿真方面,也涉及到异步电机的负荷建模^[4]。建立精确的仿真模型有助于深入理解异步电机的运行特性。异步电机的建模一直是研究难点。

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2021-08-18

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(PDB11202000858)

作者简介: 刘科研(1978—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事配电网建模仿真与智能分析研究,E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn

通信作者: 夏越(1988—),男,副教授,博士生导师,主要从事综合能源系统动态建模与仿真研究,E-mail: xiayuexiayue@163.com

dq0 变换(或称为 Park 变换)广泛应用于异步电机建模。将相域 abc 变量转换到 dq0 变量的优点在于 dq0 坐标系下的电机电感矩阵为恒定的,可有效提高电机的计算效率^[5-7]。然而,dq0 异步电机模型无法与外部电网模型直接相连,只能采用间接的电机-电网接口。间接的机网接口会产生较大的接口误差,影响系统仿真的准确性^[8]。为确保 dq0 电机模型与电网模型接口的稳定性与准确性,必须采用较小的仿真步长。为了改进电机-电网接口,文献[9]提出了一种具有直接机网接口的相域(Phase domain, PD)异步电机暂态模型,将相域电机的定子电路在相域 abc 坐标系下表示。文献[10]提出了一种具有直接电机-电网接口的 voltage-behind-reactance(VBR)异步电机暂态模型。与传统的相域异步电机模型相比,在相同的仿真步长下,VBR 异步电机模型具有更高的准确度与计算效率^[11-12]。然而由于电磁暂态建模的原因,仿真步长仍然受到限制,不足以支撑高效的机电暂态仿真。

为了解决仿真步长与精度之间的矛盾,提高机电暂态期间模型的计算效率,文献[13]提出了一种基于移频分析法(Shifted frequency analysis, SFA)的相域异步电机模型,将电机中的电气量通过动态相量表示。该模型通过移频变换移除系统基频载波以提高仿真时间步长,从而实现高效的低频暂态仿真。文献[14]基于自适应移频分析法提出了多时间尺度异步电机暂态仿真模型,通过动态调整移频变换参数和仿真时间步长实现了准确高效的低频暂态与高频暂态仿真。

然而,上述相域异步电机模型与 VBR 异步电机模型的等效导纳矩阵均与转子角度相关。当电机转子角度发生改变时,电机等效导纳矩阵也随之发生改变。由于电机导纳矩阵为整个电网导纳矩阵的一部分,当电机导纳矩阵随时间而变化时,意味着每个仿真步长整个电网的导纳矩阵都需要更新一次。当电网规模较大时,更新电网导纳矩阵的操作将产生巨大的耗时,影响整个系统的仿真效率。因此,恒定的电机导纳矩阵是一种非常重要的特性。文献[15]提出了一种具有恒定导纳矩阵的近似 VBR (Approximate VBR, AVBR) 电机暂态仿真模型。通过忽略转子角度相关变量,构建出恒定的电机导纳矩阵。然而,对于 AVBR 电机模型而言,当仿真步长较大时,模型准确性无法得到保证。

本文提出基于自适应移频分析法的多模式 VBR 异步电机模型。该模型采用解析信号重构异步电机电气方程,并将移动频率作为新的电机模型参数。当应用高频电磁暂态仿真时,移动频率设置

为 0 Hz,采用 AVBR 模式。当进行低频暂态或稳态仿真时,移动频率等于载波频率,采用 VBR 模式。通过灵活的移动频率与模型模式切换,同时集成 VBR 与 AVBR 模型的优点,从而实现准确、高效的多时间尺度暂态与稳态多过程仿真。最终通过仿真算例测试,验证所提出的多模式 VBR 模型的准确性和效率。

1 移频理论简介

交流系统电气量 $s(t)$ 都为实信号。通过希尔伯特变换可构造出相应的解析信号^[16-17]

$$\underline{s}(t) = s(t) + j\mathcal{H}[s(t)] \quad (1)$$

式中 $\mathcal{H}[\]$ ——希尔伯特变换

$\underline{s}(t)$ ——解析信号

图 1a 左侧为原始带通信号 $s(t)$ 的频谱图,右侧为解析信号 $\underline{s}(t)$ 的频谱图。

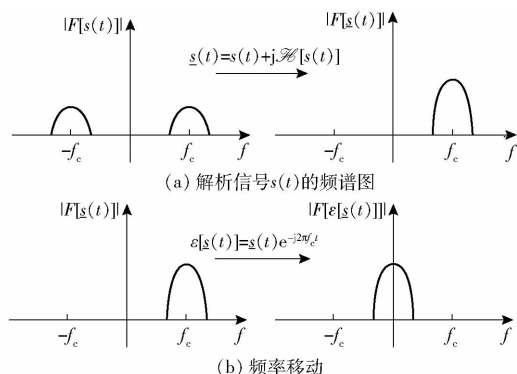


图 1 频率移动原理图

Fig. 1 Principle of frequency shifting

从图 1a 可以看出,原始实信号 $s(t)$ 的频谱图存在负频率成分;而解析信号 $\underline{s}(t)$ 的频谱图仅包含正频率成分。解析信号 $\underline{s}(t)$ 进行频率移动,得

$$S[\underline{s}(t)] = \underline{s}(t) e^{-j2\pi f_s t} \quad (2)$$

式中 f_s ——移动频率 $S[\]$ ——频率移动操作
当移动频率 f_s 等于载波频率 f_c 时,可得到解析信号 $\underline{s}(t)$ 的复包络

$$\varepsilon[\underline{s}(t)] = \underline{s}(t) e^{-j2\pi f_c t} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon[\]$ ——解析信号 $\underline{s}(t)$ 的复包络

上述频率移动过程如图 1b 所示。

解析信号的幅值计算式为

$$|\underline{s}(t)| = \sqrt{s^2(t) + \mathcal{H}[s(t)]^2} \quad (4)$$

因为 $|e^{-j2\pi f_c t}| = 1$, 式(3)的频率移动操作并不会改变解析信号 $\underline{s}(t)$ 的幅值,即

$$|\varepsilon[\underline{s}(t)]| = |\underline{s}(t)| \quad (5)$$

值得注意的是,原始信号 $s(t)$ 的频率集中在 f_c 附近,而移频后的复包络信号是一个频率在 0 Hz 左右的窄带信号。根据奈奎斯特采样定律^[17],相较于

原始带通信号,移频之后的信号可采用较大的采样步长,从而提高计算效率。

2 多模式 VBR 异步电机仿真模型

2.1 多尺度 VBR 异步电机模型

多尺度 VBR 异步电机模型的定子电压方程可以表示为^[10]

$$\underline{v}_{abcs}(t) = \text{diag}(r_D, r_D, r_D) \underline{i}_{abcs}(t) + \text{diag}(L_D, L_D, L_D) \frac{d \underline{i}_{abcs}(t)}{dt} + \underline{v}''_{abcs}(t) \tag{6}$$

其中

$$r_D = R_s + \frac{L_m''^2}{L_{lr}^2} R_r \tag{7}$$

$$L_D = L_{ls} + L_m'' \tag{8}$$

$$L_m'' = \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{lr}} \right)^{-1} \tag{9}$$

式中 $\underline{v}_{abcs}(t)$ ——定子电压
 $\underline{i}_{abcs}(t)$ ——定子电流
 $\underline{v}''_{abcs}(t)$ ——次暂态电压
 r_D ——VBR 电机模型的定子等效电阻
 L_D ——VBR 电机模型的定子等效电感
 R_s ——电机定子电阻
 R_r ——电机转子电阻
 L_{ls} ——电机定子漏感
 L_{lr} ——电机转子漏感
 L_m ——电机励磁电感
 L_m'' ——VBR 电机模型的定子等效励磁电感

为了实现频率移动,采用解析信号重构电压方程式(6)中的电气量

$$\underline{v}_{abcs}(t) = \text{diag}(r_D, r_D, r_D) \underline{i}_{abcs}(t) + \text{diag}(L_D, L_D, L_D) \frac{d \underline{i}_{abcs}(t)}{dt} + \underline{v}''_{abcs}(t) \tag{10}$$

式中 $\underline{v}_{abcs}(t)$ ——定子电压解析信号
 $\underline{i}_{abcs}(t)$ ——定子电流解析信号
 $\underline{v}''_{abcs}(t)$ ——次暂态电压解析信号

式(10)等号两边同时乘 $e^{-j2\pi f_s \tau}$,并采用隐式梯形积分法进行离散化,整理得到

$$\underline{v}_{abcs}(k) = \left[\text{diag}(r_D, r_D, r_D) + \left(\frac{2}{\tau} + j2\pi f_s \right) \text{diag}(L_D, L_D, L_D) \right] \underline{i}_{abcs}(k) + \underline{v}''_{abcs}(k) + \underline{e}_{sh}^{vbr}(k) \tag{11}$$

其中

$$\underline{e}_{sh}^{vbr}(k) = \left[\text{diag}(r_D, r_D, r_D) + \left(-\frac{2}{\tau} + j2\pi f_s \right) \cdot \text{diag}(L_D, L_D, L_D) \right] e^{j2\pi f_s \tau} \underline{i}_{abcs}(k-1) - e^{j2\pi f_s \tau} \underline{v}_{abcs}(k-1) + e^{j2\pi f_s \tau} \underline{v}''_{abcs}(k-1) \tag{12}$$

式中 $\underline{e}_{sh}^{vbr}(k)$ ——定子侧历史项
 k ——步长计数
 τ ——仿真步长

次暂态电压 $\underline{v}''_{abcs}(k)$ 计算式为

$$\underline{v}''_{abcs}(k) = \underline{K}(k) \underline{i}_{abcs}(k) + \underline{e}_{rh}^{vbr}(k) \tag{13}$$

其中 $\underline{e}_{rh}^{vbr}(k) = \underline{K}_s^{-1} \begin{bmatrix} h_{qr}(k) - jh_{dr}(k) & h_{dr}(k) + jh_{qr}(k) & 0 \end{bmatrix}^T \tag{14}$

式中 $\underline{e}_{rh}^{vbr}$ ——转子侧历史项
 $\underline{K}(k)$ ——系数矩阵
 $\underline{K}_s$ ——坐标变换矩阵
 $h_{qr}(k)$ ——d 轴转子电压历史项
 $h_{dr}(k)$ ——q 轴转子电压历史项

式(13)中的次暂态电压 $\underline{v}''_{abcs}(k)$ 的计算过程可参照文献[14]。

将式(13)代入式(11),整理可得 VBR 异步电机多尺度诺顿等效模型为

$$\underline{i}_{abcs}(k) = \underline{G}_{eq}^{vbr}(k) \underline{v}_{abcs}(k) + \underline{\eta}^{vbr}(k) \tag{15}$$

其中

$$\underline{G}_{eq}^{vbr}(k) = \left[\text{diag}(r_D, r_D, r_D) + \left(\frac{2}{\tau} + j2\pi f_s \right) \cdot \text{diag}(L_D, L_D, L_D) + \underline{K}(k) \right]^{-1} \tag{16}$$

$$\underline{\eta}^{vbr}(k) = -\underline{G}_{eq}^{vbr}(k) (\underline{e}_{sh}^{vbr}(k) + \underline{e}_{rh}^{vbr}(k)) \tag{17}$$

式中 $\underline{G}_{eq}^{vbr}(k)$ ——VBR 模型的等效导纳矩阵
 $\underline{\eta}^{vbr}(k)$ ——VBR 模型的诺顿注入电流
电机的诺顿等效电路如图 2 所示。

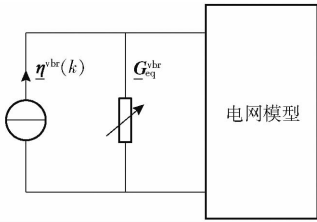


图 2 多尺度 VBR 异步电机模型

Fig. 2 Model of multi-scale VBR induction motor

将 $\underline{K}(k)$ 代入式(16)可得

$$\underline{G}_{eq}^{vbr}(k) = \begin{bmatrix} \underline{d} & k_2 & k_3 \\ k_3 & \underline{d} & k_2 \\ k_2 & k_3 & \underline{d} \end{bmatrix}^{-1} \tag{18}$$

其中 $\underline{d} = r_D + \left(\frac{2}{\tau} + j2\pi f_s \right) L_D + k_1 \tag{19}$

式中 k_1, k_2, k_3 ——系数^[14]

从式(18)可以看出,多尺度 VBR 模型的等效导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{vbr}$ 与 k_2, k_3 相关,而后者与电机转速有关。因此,当电机转速发生改变时,电机导纳矩阵需重新计算。当采用较小仿真步长进行高频暂态

仿真时,模型与系统的计算耗时将大幅度提升。

2.2 AVBR 异步电机模型

为解决多尺度 VBR 模型等效导纳矩阵无法保持恒定的问题,推导了具有恒定导纳矩阵的 AVBR 异步电机模型。AVBR 模型的核心思想是在多尺度 VBR 模型的基础上通过消除与转子转速相关项,从而获得一个恒定导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}$ 。在 $f_s = 0$ Hz 的无频移的情况下,式(18)中的系数 $\underline{d}$ 和导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{vbr}$ 都是实数。当电机模型采用转子坐标系时,系数 k_1 是常数,故 $\underline{d}$ 也是常数,系数 k_2 和 k_3 仍与转子转速呈线性关系。在无频移时,积分时间步长很小,根据文献[15]的相关推导可知,式(18)中的对角元素 $\underline{d}$ 比非对角元素 k_2 和 k_3 小得多。由于对角元素占主导,因此时变矩阵 $\underline{G}_{eq}^{vbr}$ 可以用常数矩阵来表达

$$\underline{G}_{eq}^{avbr}(k) = \begin{bmatrix} \underline{d} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{d} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{d} \end{bmatrix}^{-1} \quad (20)$$

类似于多尺度 VBR 模型的推导过程,AVBR 异步电机诺顿等值模型可表示为

$$\underline{i}_{abcs}(k) = \underline{G}_{eq}^{avbr} \underline{v}_{abcs}(k) + \underline{\eta}^{avbr}(k) \quad (21)$$

$$\underline{G}_{eq}^{avbr} = (\underline{R}_{eq}^{avbr})^{-1} \quad (22)$$

$$\underline{\eta}^{avbr}(k) = -\underline{G}_{eq}^{avbr} (\underline{e}_{sh}^{vbr}(k) + \underline{e}_{rh}^{vbr}(k)) \quad (23)$$

式中 $\underline{G}_{eq}^{avbr}(k)$ ——AVBR 模型的等效导纳矩阵

$\underline{\eta}^{avbr}(k)$ ——AVBR 模型的诺顿注入电流

电机的诺顿等效电路如图 3 所示。

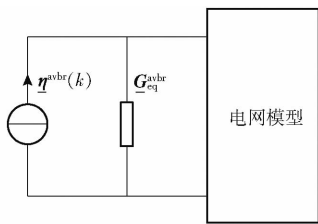


图 3 AVBR 异步电机模型

Fig. 3 Model of AVBR induction motor

AVBR 模型的电机等效导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{avbr}$ 是一个恒定矩阵。相比于多尺度 VBR 模型的导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{vbr}$,它不会在每个步长下都被重新计算。因此,AVBR 模型具有更高的计算效率。然而,AVBR 模型的准确度受到仿真步长的影响。已有研究表明:当仿真步长较大时,忽略 k_2 和 k_3 会大幅度降低模型的准确度^[15]。为克服这一问题,提出了一种结合多尺度 VBR 模型与 AVBR 模型的多模式 VBR (Multi-mode voltage-behind-reactance, MVBR) 模型。

2.3 MVBR 异步电机模型

与多尺度 VBR 模型和 AVBR 模型相似,MVBR

模型等效电路表示为

$$\underline{i}_{abcs}(k) = \underline{G}_{eq}^{mvbr}(k) \underline{v}_{abcs}(k) + \underline{\eta}^{mvbr}(k) \quad (24)$$

其中

$$\underline{G}_{eq}^{mvbr}(k) = \begin{cases} \underline{G}_{eq}^{avbr}(k) & (\text{小步长}, f_s = 0 \text{ Hz}) \\ \underline{G}_{eq}^{vbr}(k) & (\text{大步长}, f_s = f_c) \end{cases} \quad (25)$$

$$\underline{\eta}^{mvbr}(k) = \begin{cases} \underline{\eta}^{avbr}(k) & (\text{小步长}, f_s = 0 \text{ Hz}) \\ \underline{\eta}^{vbr}(k) & (\text{大步长}, f_s = f_c) \end{cases} \quad (26)$$

式中 $\underline{G}_{eq}^{mvbr}(k)$ ——MVBR 模型的等效导纳矩阵

$\underline{\eta}^{mvbr}(k)$ ——MVBR 模型的诺顿注入电流

当电磁暂态发生时,仿真需要以较小的时间步长进行,由式(25)、(26)的第 1 行可知,MVBR 模型会以 AVBR 模型的方式仿真以提高效率;低频稳态时,重点关注包络信号,移动频率 f_s 等于载波频率 f_c ,仿真以较大的时间步长进行,由式(25)、(26)的第 2 行可知,此时 MVBR 模型会以多尺度 VBR 模型的方式仿真,确保模型的准确度。

2.4 异步电机转子运动方程

电机转子运动方程为

$$\frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{2J} (T_e(t) - T_m(t)) \quad (27)$$

$$\frac{d\theta_r(t)}{dt} = \omega_r(t) \quad (28)$$

式中 ω_r ——转子角速度

p ——磁极数

J ——电机转动惯量

T_e ——电机电磁转矩

T_m ——电机机械转矩

θ_r ——转子转角

使用隐式梯形积分法对式(27)、(28)离散化得到的转子运动方程为

$$\omega_r(k) = \omega_r(k-1) + \frac{p}{4} \frac{\tau}{J} (T_e(k) + T_e(k-1) - T_m(k) - T_m(k-1)) \quad (29)$$

$$\theta_r(k) = \theta_r(k-1) + \frac{\tau}{2} (\omega_r(k) + \omega_r(k-1)) \quad (30)$$

电磁转矩表示为

$$T_e(k) = \frac{3p}{4} [\text{Re}(\underline{\lambda}_{md}(k)) \text{Re}(\underline{i}_{qs}(k)) - \text{Re}(\underline{\lambda}_{mq}(k)) \text{Re}(\underline{i}_{ds}(k))] \quad (31)$$

式中 Re ——实部

2.5 MVBR 模型实现

为了详细描述上文所提电机模型的实现过程,假设所提出的 MVBR 电机模型与电网相连。电机

的定子侧端电压 $v_{abcs}(k)$ 已知,如端电压可通过基于节点分析法的电网求解器获取。本文所提出的 MVBR 模型的具体实现步骤为:

(1) 计算电机的初始变量。移动频率 $f_s = 0$ Hz 时, MVBR 的导纳矩阵是恒定的 $\underline{G}_{eq}^{avbr}(k)$, 该导纳矩阵可在进入主循环之前计算得出, 只需计算一次。

(2) 所提出 MVBR 电机模型从网络求解器中获得电机端电压 $v_{abcs}(k)$ 的相关信息, 并以此作为电机模型的输入量。

(3) 检测系统是否出现非连续性事件(如故障), 如未出现非连续事件, 执行步骤(4), 反之执行步骤(5)。

(4) 设置移动频率为载波频率, $f_s = f_c$, 选择多尺度 VBR 模型, 计算第 k 步的电机电气量, 具体为: ①根据式(12)、(14)计算历史项 $\underline{e}_{sh}^{vbr}(k)$ 和 $\underline{e}_{rh}^{vbr}(k)$ 。②根据式(16)、(17)计算电机等效导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{vbr}(k)$ 和诺顿注入电流 $\underline{\eta}^{vbr}(k)$ 。

(5) 设置移动频率为 0 Hz, 选择 AVBR 模型, 计算第 k 步的电机电气量, 具体为: ①根据式(12)、(14)计算历史项 $\underline{e}_{sh}^{vbr}(k)$ 和 $\underline{e}_{rh}^{vbr}(k)$ 。②根据式(22)、(23)计算电机等效导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{avbr}(k)$ 和诺顿注入电流 $\underline{\eta}^{avbr}(k)$ 。

(6) 计算电机模型的机械量。①根据式(31)计算电机电磁转矩 $T_e(k)$ 。②根据式(29)、(30)计算电机角速度 $\omega_r(k)$ 和电机转子转角 $\theta_r(k)$ 。

(7) 将诺顿电流 $\underline{\eta}^{mvbr}(k)$ 和等效导纳矩阵 $\underline{G}_{eq}^{mvbr}(k)$ 的信息返回给电网求解器。

(8) 电网求解器将根据返还的数据, 计算并更新整个系统的节点电压。最终, 步长计数器 k 将增加, 若满足结束条件, 仿真结束, 反之返回步骤(2)。

3 仿真实验

为了验证 MVBR 异步电机模型的准确性与有效性, 使用一个单机无穷大系统进行测试。该系统主要用于分析单个电机模型的准确性与效率。采用一台 368 kW 的鼠笼式异步电动机作为测试电机, 电机参数^[5]如表 1 所示。在 Matlab/Simulink 中使用状态变量法和标准库中的元件建立异步电机的 dq0 模型, 将此模型作为参考模型, 与多尺度 VBR 模型和 MVBR 模型进行对比。3 种模型的参数保持一致。为了获得准确的参考结果, 参考模型的仿真步长设为 1 μ s。

表 2 总结了电机不同运行阶段。在 0.2 s 前, 电机处于稳定运行的初始阶段。 $t = 0.2$ s 时电机发生故障, 定子侧端点三相接地, 引起高频暂态过程。

表 1 异步电机参数

Tab.1 Parameters of induction machine

参数	数值
额定功率 P_{rated}/kW	368
额定线电压 V_n/kV	2.3
额定频率 f_n/Hz	60
定子电阻 R_s/Ω	0.262
转子电阻 R_r/Ω	0.187
互感抗 X_m/Ω	54.02
定子漏抗 X_{ls}/Ω	1.206
转子漏抗 X_{lr}/Ω	1.206
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	11.06
磁极数 p	4

表 2 电磁暂态过程移动频率 f_s 与时间步长 τ 的设置

Tab.2 Setting of f_s and time-step size τ in study of diverse transients

时间/s	阶段	移动频率 f_s/Hz	时间步长 τ/s	电机 模型
0 ~ 0.2	稳态	60	2×10^{-2}	VBR
0.2 ~ 0.5	故障暂态	0	5×10^{-5}	AVBR
0.5 ~ 0.9	恢复期暂态	60	2×10^{-3}	VBR
0.9 ~ 1.2	接近稳态	60	2×10^{-2}	VBR

$t = 0.3$ s 时故障被切除, 此后一段时间内系统持续存在高频暂态。在 0.5 s 左右, 高频暂态衰减, 低频暂态占主导。 $t = 0.9$ s 时, 电机基本恢复稳态。表 2 同时给出了电磁暂态过程中移动频率 f_s 和时间步长 τ 的设置情况。移动频率及仿真步长的选择可参照文献[15]。

3 种仿真模型得到的电磁转矩 T_e 和电机转子角速度 ω_r 分别如图 4 和图 5 所示。由图 4、5 可知, 多尺度 VBR 模型和 MVBR 模型的仿真结果与参考结果都非常接近。图 6 为电机的 a 相定子电流, 其中 MVBR 模型的定子电流仿真时同时使用了瞬时值曲线和包络曲线。图 7 为各阶段的波形放大图。从图 7 可以看出, MVBR 模型和参考模型的仿真结果无明显差别。

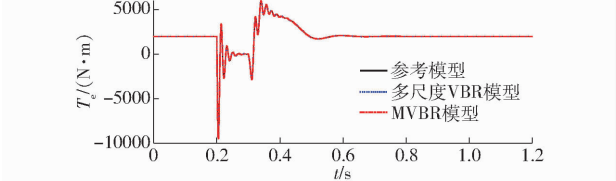


图 4 电机端口三相接地故障电磁转矩 T_e 曲线

Fig.4 Curves of electromagnetic torque T_e for a three-phase-to-ground fault at terminals of induction machine

在前 0.2 s 的初始阶段, 电机处于稳定状态, 电机的稳态值用包络曲线描述, 移动频率等于系统的载波频率(60 Hz), 仿真步长为 20 ms。由于仿真步长较大, 为保证模型准确性, 电机模型采用多尺度

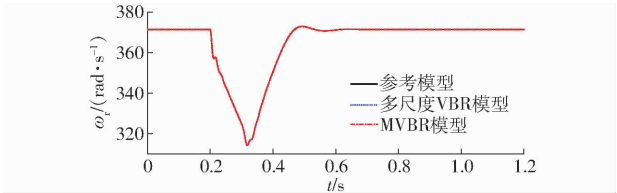


图5 电机端口三相接地故障电机转子角速度 ω_r 曲线

Fig. 5 Curves of motor speed ω_r for a three-phase-to-ground fault at terminals of induction machine

VBR 模式。当 $t=0.2\text{ s}$ 时,电机定子侧发生三相接地故障,电机处于高频暂态,用瞬时值曲线描述该过程,移动频率为 0 Hz ,仿真步长为 $50\text{ }\mu\text{s}$ 。同时,为了提高仿真效率,电机模型采用 AVBR 模式。当 $t=0.3\text{ s}$ 时,故障被切除,此时系统仍存在高频分量,移

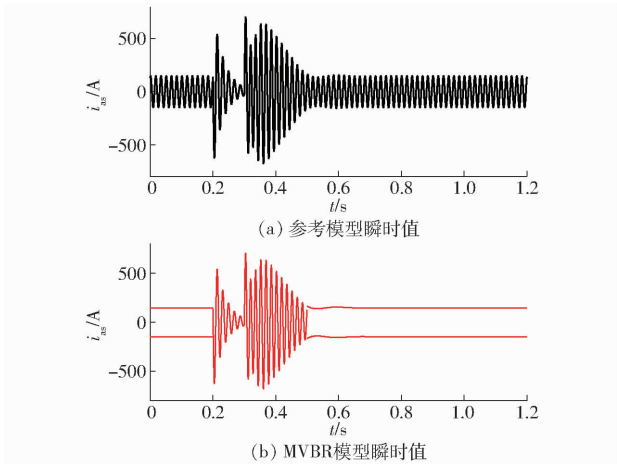


图6 a相定子电流 i_{as}

Fig. 6 Phase a stator current i_{as}

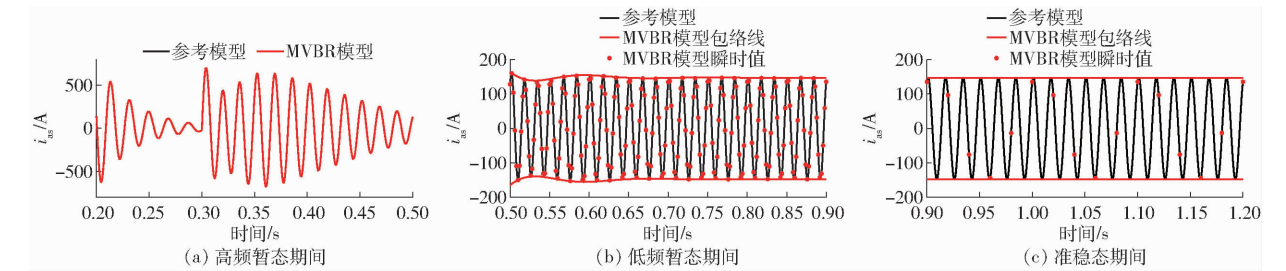


图7 a相定子电流 i_{as} 放大图

Fig. 7 Zoomed-in view of stator current i_{as}

动频率保持为 0 Hz ,仿真步长保持为 $50\text{ }\mu\text{s}$,使用瞬时值曲线进行仿真。在 0.5 s 左右,大部分高频暂态已衰减,移动频率设置为 60 Hz ,时间步长增大到 2 ms ,采用包络线仿真。当 $t=0.9\text{ s}$ 时,电机基本恢复到稳态,仿真步长重新设置为 20 ms ,MVBR 模型切换至多尺度 VBR 模式。

采用 2 范数误差分析 MVBR 模型的准确度,误差计算式为^[19]

$$\varepsilon(s)=\frac{\|\hat{s}-s\|_2}{\|\hat{s}\|_2}\times 100\% \tag{32}$$

式中 s ——MVBR 模型的仿真结果

$\hat{s}$ ——参考模型的仿真结果

$\|s\|_2$ —— s 的 2 范数

表 3 给出了 MVBR 模型与参考模型在各个阶段的 2 范数误差。

表 3 MVBR 模型定子电流 i_{as} 的 2 范数误差

Tab.3 2-norm error of the stator current i_{as} for the proposed MVBR model

时间/s	阶段	i_{as} 的 2 范数误差/%
0~0.2	稳态	0.001 7
0.2~0.5	故障暂态	0.159 9
0.5~0.9	恢复期暂态	0.265 1

进一步采用浮点运算数评价提出模型的计算效

率。建模过程中所涉及的每一次计算视作一次浮点运算^[20]。表 4 给出了单步长下多尺度 VBR 模型和 MVBR 模型的浮点运算数及三角函数。三角函数的计数规则见文献[10],一次三角函数的运算时间相当于 20 次浮点运算耗费的时间。

表 4 多尺度 VBR 模型与 MVBR 模型单步长浮点运算数对比

Tab.4 Flops per step in multi-scale VBR model and MVBR model

项	多尺度 VBR 模型 ($f_s=0\text{ Hz}/f_s=f_c$)		MVBR 模型 ($f_s=0\text{ Hz}/f_s=f_c$)	
	浮点运算数	三角函数	浮点运算数	三角函数
ω_e, θ_e	5/5		5/5	
K_s, K_s^{-1}	8/8	2/2	8/8	2/2
G_{eq}^{vbr}	24/65		0/65	
$\underline{q}^{vbr}$	107/173		107/173	
λ_{dqr}	26/26		26/26	
T_e	4/4		4/4	
总浮点数	214/321		190/321	

从表 4 可知,当 $f_s=f_c$ 时,MVBR 模型与多尺度 VBR 模型等效,2 个模型计算效率无差别。当 $f_s=0\text{ Hz}$ 时,MVBR 模型单步长浮点计算数为 190,多尺度 VBR 模型的浮点计算数为 214。MVBR 模型的等效导纳矩阵为恒定矩阵,避免了每个仿真步长下重新计算的问题。与多尺度 VBR 模型相比,其仿真效

率更高。值得注意的是,当电机接入系统后,由于MVBR电机模型具有恒定的导纳矩阵,整个系统的导纳矩阵都不需要重新计算,其带来的计算效率提升将更为明显。

4 结束语

提出了一种多模式VBR异步电机多尺度暂态仿真模型。该模型具有直接的电机-电网模型接口,避免了因间接接口引起的接口误差问题。多模式VBR模型通过调整运行模式,集成了多尺度VBR模型与电磁暂态AVBR模型的优点。当进行高频

暂态仿真时,采用微秒级仿真步长,MVBR模型等效于AVBR模型,导纳矩阵为恒定矩阵。由于构建了恒定的电机导纳矩阵,当转子转角发生改变时,不再需要更新整个电网的导纳矩阵,大幅度提高系统的计算效率。当进行低频暂态或稳态仿真时,MVBR切换至多尺度VBR模式。此时,模型通过移频变换可支持使用毫秒级或数十毫秒级的仿真步长。最终,通过算例测试验证了所提出模型的准确性与效率。测试结果表明,所提出的模型具有很高的准确度,且其计算效率高于现有的电磁暂态AVBR模型和多尺度VBR模型。

参 考 文 献

- [1] 刘中正,侯加林,辛杰,等.智能化设施育苗机设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):136-142.
LIU Zhongzheng, HOU Jialin, XIN Jie, et al. Design and experiment of intelligent facilities seedling machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 136-142. (in Chinese)
- [2] 张今朝,魏海峰,刘君伟.多层农场用电梯扩展载货驱动系统建模与控制[J].农业机械学报,2020,51(6):412-419.
ZHANG Jinzhao, WEI Haifeng, LIU Junwei. Modeling and control of elevator extended load-driven system for multi-storey farm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 412-419. (in Chinese)
- [3] 刘彬,闫政,葛磊,等.小型液压挖掘机电驱动动力源特性研究[J].农业机械学报,2019,50(11):387-393.
LIU Bin, YAN Zheng, GE Lei, et al. Electric drive hydraulic power source characteristics of small hydraulic excavator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 387-393. (in Chinese)
- [4] 刘念,张建华,熊浩,等.面向电力仿真系统异构性的CIM扩展方法[J].电网技术,2008,32(21):58-62.
LIU Nian, ZHANG Jianhua, XIONG Hao, et al. An extension method of common information model oriented to heterogeneity of electric power simulation system [J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 58-62. (in Chinese)
- [5] KRAUSE P C, WASYN CZUK O, SUDHOFF S D, et al. Analysis of electric machinery and drive systems [M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] GOLE A M, MENZIES R, TURANLI H M, et al. Improved interfacing of electrical machine models to electromagnetic transients programs [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 4(9): 2446-2451.
- [8] XIA Y, CHEN Y, YE H, et al. Multi-scale induction machine modeling in the dq0 domain including main flux saturation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 652-664.
- [9] MARTI J R, MYERS T O. Phase-domain induction motor model for power system simulators [C] // WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing. Conference Proceedings. IEEE, 1995: 276-282.
- [10] WANG L, JATSKEVICH J, WANG C, et al. A voltage-behind-reactance induction machine model for the EMTP-type solution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1226-1238.
- [11] WANG L, JATSKEVICH J. Magnetically-saturable voltage-behind-reactance synchronous machine model for EMTP-type solution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2355-2363.
- [12] WANG L, JATSKEVICH J, DINAVAH I V, et al. Methods of interfacing rotating machine models in transient simulation programs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 891-903.
- [13] ZHANG P, MARTI J R, DOMMEL H W. Induction machine modeling based on shifted frequency analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 157-164.
- [14] 夏越,陈颖,宋炎侃,等.基于自适应移频分析法的voltage-behind-reactance异步电机多时间尺度暂态建模与仿真[J].电网技术,2018,42(12):3872-3881.
XIA Yue, CHEN Ying, SONG Yankan, et al. Voltage-behind-reactance induction machine model for multi-timescale transient simulation [J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3872-3881. (in Chinese)
- [15] WANG L, JATSKEVICH J. Approximate voltage-behind-reactance induction machine model for efficient interface with EMTP network solution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 25(2): 1016-1031.
- [16] STRUNZ K, SHINTAKU R, GAO F. Frequency-adaptive network modeling for integrative simulation of natural and envelope waveforms in power systems and circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(12): 2788-2803.
- [17] ZHANG P, MARTI J R, DOMMEL H W. Shifted-frequency analysis for EMTP simulation of power-system dynamics [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2010, 57(9): 2564-2574.
- [18] MITRA S K, KUO Y. Digital signal processing: a computer-based approach [M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [19] GAUTSCHI W. Numerical analysis: an introduction [M]. Boston: Birkhauser, 1997.
- [20] LOAN C V. Computational frameworks for the fast Fourier transform [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.