

新型电力系统综合负荷广义离散等值模型

沈 赋¹,李施伟¹,陈雪鸥²,翟苏巍³,杨志文¹,杨光兵¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650500;

2. 云南电网有限责任公司培训与评价中心,云南 昆明 650106;

3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院,云南 昆明 650217)

摘要:针对新型电力系统中不同组成、不同复杂程度的综合负荷,亟需一种通用的模型结构来满足新型电力系统在线安全分析精度的要求。对含电动机负荷和静态负荷的综合负荷模型进行研究,分别建立新型电力系统下考虑电压相角变化和忽略电压相角变化的综合负荷广义离散等值模型,得到综合负荷广义离散等值模型的参数,并分析模型参数与电力系统各元件的内在联系以及各模型系数间的物理特性。通过 CEPRI-36 节点系统的仿真对比验证了所建模型的普适性和有效性。

关键词:新型电力系统;综合负荷;电动机负荷;静态负荷;广义离散等值模型

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205053

0 引言

与传统电力系统相比,新型电力系统负荷具有结构更多元化、特性更复杂、用户双方互动更深入等特点。在新型电力系统下,负荷建模变得更加复杂且负荷预测更加困难,同时存在高次谐波注入、带宽振荡等问题。在对新型电力系统负荷进行建模时,由于新型电力系统中元件数量巨大,若对整个新型电力系统中的所有元件同时进行建模,则难度将非常大^[1-4]。大量研究表明,电力综合负荷是新型电力系统的重要组成部分,对系统潮流、暂态稳定和电压稳定的影响很大,由于分散、灵活等特性,当大量电力综合负荷接入电网时,会给电网的安全稳定运行带来不可控因素,这使得电力综合负荷的接入受到一定的限制。

为了满足兼顾精度和速度的建模需求^[5-6],可以将电力负荷^[7-9]等效为含等值静态负荷和等值动态负荷的综合负荷进行建模。在传统电力系统的负荷建模过程中,采用的传递函数模型是一种线性化等效模型,在大扰动下,该模型由于误差过大而无法使用^[10]。采用差分方程模型对综合负荷进行建模时,

假设模型参数不变再对参数进行辨识,缺乏机理意义。此外,无论是从宏观还是微观的角度对综合负荷进行分析都受较多因素影响,综合负荷具有复杂的非线性特征^[11],要对这种负荷进行建模将非常困难。

针对非线性系统的建模:文献[12]提出将特征模型用于复杂高阶线性或者非线性连续系统的建模,在非线性系统建模方面取得了突破性的进展;文献[13]针对工程实际中遇到的非线性系统,设计低阶控制器,提出非线性系统的低阶变参数特征模型的原理和方法,并论证所建特征模型与实际对象的等价性;文献[14]在综合比较面向复杂航天器的常规化建模方法、工程化建模方法和智能化建模方法的基础上,提出面向复杂航天器控制应用的模糊动态特征建模与控制方法。

由于特征建模需要满足模型参数慢时变、单输入单输出等条件,而在新型电力系统综合负荷建模的过程中并不严格符合这些条件,因此,特征模型很难适用于新型电力系统的综合负荷建模。

综上,本文提出适用于新型电力系统综合负荷建模的广义离散等值模型,并对模型特性进行研究。首先,分析新型电力系统综合负荷模型 CLM(Composite Load Model)结构;然后,分别解析推导考虑电压相角变化和忽略电压相角变化的新型电力系统综合负荷广义离散等值模型,并分析模型参数与电力系统各元件的内在联系以及各模型系数间的物理特性;最后,通过 CEPRI-36 节点系统算例验证所建模型的普适性和有效性。

1 CLM 结构

传统 CLM^[15-19]由静态负荷和电动机(动态负荷)并联组成,其结构如附录 A 图 A1 所示,其中静态负

收稿日期:2022-03-02;修回日期:2022-05-09

在线出版日期:2022-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107097);云南省应用基础研究计划资助项目(202101BE070001-061, 202201AU070111);昆明理工大学高层次人才平台建设项目(KKZ7202004004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52107097), the Basic Application Research and Plan Project of Yunnan Province(202101BE070001-061, 202201AU070111) and the High-level Talent Platform Construction Project of Kunming University of Science and Technology(KKZ7202004004)

荷采用恒定阻抗,电动机采用实用模型,方程中的状态变量采用电势相量。

基于该结构,可得出 CLM 的动态负荷等值模型^[7,20-24]为:

$$\begin{cases} T'_{d0} \frac{dE'}{dt} = -E' + j(X - X')I + j(\omega - 1)E'T'_{d0} \\ E' = U - (R_s + jX') \\ I = (U - E') / (R_s + jX') \\ X = X_s + X_m \\ X' = X_s X_m / (X_s + X_m) \\ T'_{d0} = (X_r + X_m) / R_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: T'_{d0} 为转子绕组时间常数; E' 为暂态电势; X 为稳态电抗; X' 为暂态电抗; I 为广义负荷节点的并网电流; ω 为转子角速度; U 为广义负荷节点的并网电压; R_s 为定子电阻; X_s 为定子电抗; X_m 为激磁电抗; X_r 为转子电抗; R_r 为转子电阻。

2 新型电力系统综合负荷广义离散等值模型

2.1 考虑电压相角的综合负荷广义离散等值模型

根据文献[25],在考虑电压相角对模型影响的情况下,要得到电流与电压和相角的传递函数,就需要对式(1)中的状态方程进行简化。由于只考虑电流与电压和相角的输入输出关系,假设转速 ω 不变,即 ω 为常数,可推导出 CLM 的电压和电流的输入输出关系,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{dI_r}{dt} = A_r I_r + B_r I_j + C U_r + D U_j + G \frac{dU_r}{dt} + F \frac{dU_j}{dt} \\ \frac{dI_j}{dt} = A_j I_r + B_j I_j + D U_r + C U_j - F \frac{dU_r}{dt} + G \frac{dU_j}{dt} \\ B = X' / [R_s^2 + (X')^2] \\ G = R_s / [R_s^2 + (X')^2] \\ \Delta X = X - X' \\ A_r = -(1 + B \Delta X) / T'_{d0} \\ B_r = \omega - 1 - G \Delta X / T'_{d0} \\ C = G / T'_{d0} - B(\omega - 1) \\ D = G(\omega - 1) \\ F = B / T'_{d0} + B \\ A_j = -\omega + 1 + G \Delta X / T'_{d0} \\ B_j = -(1 + B \Delta X) / T'_{d0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_r 和 I_j 分别为考虑电压相角变化的 CLM 动态负荷等值模型的电流实部和虚部; U_r 和 U_j 分别为考虑电压相角变化的 CLM 动态负荷等值模型的电压实部和虚部。

进一步,在式(2)的基础上,推导以电压幅值和相角作为输入、电流实部和虚部作为输出的负荷模型的增量形式关系,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta I_r}{dt} = A_r \Delta I_r + B_r \Delta I_j + C_r \Delta U + D_r \Delta \varphi + \\ E_r \frac{d\Delta U}{dt} + F_r \frac{d\Delta \varphi}{dt} \\ \frac{d\Delta I_j}{dt} = A_j \Delta I_r + B_j \Delta I_j + C_j \Delta U + D_j \Delta \varphi + \\ E_j \frac{d\Delta U}{dt} + F_j \frac{d\Delta \varphi}{dt} \\ C_r = C \cos \varphi_0 + D \sin \varphi_0 \\ D_r = -C U_0 \sin \varphi_0 + D U_0 \cos \varphi_0 \\ E_r = G \cos \varphi_0 + F \sin \varphi_0 \\ F_r = F U_0 \cos \varphi_0 - G U_0 \sin \varphi_0 \\ C_j = D \cos \varphi_0 + C \sin \varphi_0 \\ D_j = C U_0 \cos \varphi_0 - D U_0 \sin \varphi_0 \\ E_j = -F \cos \varphi_0 + G \sin \varphi_0 \\ F_j = G U_0 \cos \varphi_0 + F U_0 \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔI_r 和 ΔI_j 分别为考虑电压相角变化的 CLM 动态负荷等值模型的电流实部和虚部的增量; ΔU 为考虑电压相角变化的 CLM 动态负荷等值模型的电压幅值增量; $\Delta \varphi$ 为考虑电压相角变化的 CLM 动态负荷等值模型的电压相角增量; φ_0 和 U_0 分别为系统并网点初始并网相角和初始电压幅值。

将式(3)进行拉氏变换,可得到频域下的 CLM 为:

$$\begin{cases} s \Delta I_r(s) = A_r \Delta I_r(s) + B_r \Delta I_j(s) + C_r \Delta U(s) + D_r \Delta \varphi(s) + \\ s E_r \Delta U(s) + s F_r \Delta \varphi(s) \\ s \Delta I_j(s) = A_j \Delta I_r(s) + B_j \Delta I_j(s) + C_j \Delta U(s) + D_j \Delta \varphi(s) + \\ s E_j \Delta U(s) + s F_j \Delta \varphi(s) \end{cases} \quad (4)$$

基于式(4),利用双线性变换^[2,22]分别得到电流的实部与虚部相对于端口电压幅值和端口电压相角的传递函数形式,令 $s = 2(1 - z^{-1}) / [h(1 + z^{-1})]$ (z 为 Z 变换因子, h 为采样步长),得到如式(5)所示的考虑电压相角的综合负荷广义离散等值模型,简称 $I_r I_j - U \varphi$ 模型。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r(k+2) \\ \Delta I_j(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{r1} & \theta_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_{j1} & \theta_{j2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_r(k) \\ \Delta I_j(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta U(k+2) \\ \Delta U(k+1) \\ \Delta U(k) \\ \Delta \varphi(k+2) \\ \Delta \varphi(k+1) \\ \Delta \varphi(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: k 为采样时刻; $\theta_{r1} - \theta_{r8}$ 为模型实部系数, $\theta_{j1} - \theta_{j8}$ 为模型虚部系数,表达式如附录 B 所示。

由式(5)知,CLM 方程模型的系数 $\theta_{r1} - \theta_{r8}$ 、 $\theta_{j1} -$

θ_{js} 与转子角速度 ω 、转子绕组时间常数 T'_{d0} 、定子电阻 R_s 、转子电阻 R_r 、定子电抗 X_s 、转子电抗 X_r 、激磁电抗 X_m 以及采样步长 h 有关。

当采样步长 h 很小时,各系数存在如下关系:

$$\sum_{i=1}^2 \theta_{ri} = \frac{3(B_j A_r + B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \approx 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=3}^8 \theta_{ri} = \frac{4(B_j C_r + B_r C_j + B_j D_r + B_r D_j)h^2}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \approx 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^2 \theta_{ji} = \frac{3(B_j A_r + B_r A_j)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \approx 1 \quad (8)$$

$$\sum_{i=3}^8 \theta_{ji} = \frac{4(B_j C_r + B_r C_j + B_j D_r + B_r D_j)h^2}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \approx 0 \quad (9)$$

即当采样步长 h 很小时,模型输出项的系数之和近似等于1,模型输入项的系数之和近似等于0。

2.2 忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型

根据文献[25],在忽略电压相角对模型影响的情况下,要得到电流与电压的传递函数,就需对式(1)中的状态方程进行简化。由于只考虑电压与电流的输入输出关系,假设转速 ω 不变,即 ω 为常数,可推导出以电压幅值作为输入量以及电流实部、虚部作为输出量的负荷模型为:

$$\begin{cases} \frac{dI_{cr}}{dt} = A_r I_{cr} + B_r I_{cj} + C_r U + G \frac{dU}{dt} \\ \frac{dI_{cj}}{dt} = A_j I_{cr} + B_j I_{cj} + C_j U - B \frac{dU}{dt} \\ B = X' / [R_s^2 + (X')^2] \\ G = R_s / [R_s^2 + (X')^2] \\ \Delta X = X - X' \\ A_r = -(1 + B \Delta X) / T'_{d0} \\ B_r = \omega - 1 - G \Delta X / T'_{d0} \\ C_r = G / T'_{d0} - B(\omega - 1) \\ A_j = -\omega + 1 + G \Delta X / T'_{d0} \\ B_j = -(1 + B \Delta X) / T'_{d0} \\ C_j = B / T'_{d0} + G(\omega - 1) \end{cases} \quad (10)$$

式中: I_{cr} 和 I_{cj} 分别为忽略电压相角变化的流经CLM动态负荷等值模型的电流实部和虚部; U 为忽略电压相角变化的流经CLM动态负荷等值模型的电压幅值。

在忽略电压相角变化对模型影响的情况下,将式(10)的增量形式进行拉氏变换,可得到频域下的CLM如式(11)所示。

$$\begin{cases} s \Delta I_{cr}(s) = A_r \Delta I_{cr}(s) + B_r \Delta I_{cj}(s) + C_r \Delta U(s) + s G \Delta U(s) \\ s \Delta I_{cj}(s) = A_j \Delta I_{cr}(s) + B_j \Delta I_{cj}(s) + C_j \Delta U(s) - s B \Delta U(s) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta I_{cr}(s)$ 和 $\Delta I_{cj}(s)$ 分别为考虑电压相角模型电流实部时在频域下的电流实部和虚部增量。

基于式(11),利用双线性变换分别得到电流的

实部与虚部相对于端口电压幅值的传递函数形式,令 $s = 2(1 - z^{-1}) / [h(1 + z^{-1})]$,得到如式(12)所示的忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型,简称 $I_r I_j - U$ 模型。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{cr}(k+2) \\ \Delta I_{cj}(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{cr1} & \theta_{cr2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_{cj1} & \theta_{cj2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{cr}(k+1) \\ \Delta I_{cr}(k) \\ \Delta I_{cj}(k+1) \\ \Delta I_{cj}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_{cr3} & \theta_{cr4} & \theta_{cr5} \\ \theta_{cj3} & \theta_{cj4} & \theta_{cj5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U(k+2) \\ \Delta U(k+1) \\ \Delta U(k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\theta_{cr1} - \theta_{cr5}$ 为模型实部系数, $\theta_{cj1} - \theta_{cj5}$ 为模型虚部系数,表达式如附录C所示。

由式(12)可知,CLM方程模型的系数 $\theta_{cr1} - \theta_{cr5}$ 、 $\theta_{cj1} - \theta_{cj5}$ 与转子角速度 ω 、转子绕组时间常数 T'_{d0} 、定子电阻 R_s 、转子电阻 R_r 、定子电抗 X_s 、转子电抗 X_r 、激磁电抗 X_m 以及采样步长 h 有关。

当采样步长 h 很小时,各系数存在如下关系:

$$\sum_{i=1}^2 \theta_{cri} = \frac{3(B_r A_j - A_r B_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \approx 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=3}^8 \theta_{cri} = \frac{4(B_r C_j - B_j C_r)h^2}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \approx 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^2 \theta_{cji} = \frac{3(B_r A_j - A_r B_j)h^2 - 2(A_r - B_j)h + 4}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \approx 1 \quad (15)$$

$$\sum_{i=3}^8 \theta_{cji} = \frac{4(A_j C_r - A_r C_j)h^2}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \approx 0 \quad (16)$$

即当采样步长 h 很小时,模型输出项的系数之和近似等于1,模型输入项的系数之和近似等于0。

3 算例分析

本节对推导的新型电力系统综合负荷广义离散等值模型进行验证,采用的电脑操作系统为Windows 10,CPU为2.69 GHz Intel(R) Core(TM) i7-4600U,系统RAM为8 GB,PSASP版本为7.12。选取含CLM的CEPRI-36节点系统进行仿真验证,系统示意图见附录A图A2,其中在节点50处接入的CLM由电动机负荷和静态负荷组成。模型参数为: $R_s=0$, $R_r=0.02$ p.u., $X_s=0.18$ p.u., $X_r=0.12$ p.u., $X_m=3.5$ p.u.。

在区域电网外施加故障:在1 s时,线路16-29的节点16侧发生单相接地短路故障,通过调整接地电阻和电抗设置2种故障,故障1下的电压跌落程度为3%,故障2下的电压跌落程度为5%,1.2 s时故障切除。利用PSASP软件仿真记录CLM的输入电压、有功功率以及无功功率。

3.1 $I_r I_j - U\varphi$ 模型仿真验证

基于式(5)所示的 $I_r I_j - U\varphi$ 模型,研究在采样步长 $h=0.01$ s和 $h=0.02$ s时2种不同故障下模型的普适

性,并利用最小二乘法对该模型的参数进行辨识,结果如表1所示。基于辨识的参数,利用最小二乘法对 $h=0.01$ s时2种故障下的电流实部 I_r 和电流虚部 I_j 进行拟合,结果如图1和图2(图中 I_r 和 I_j 均为标幺值,后同)所示。模型的电流实部和虚部参数辨识均方根误差(RMSE)如表2所示。

由表1可知,考虑电压相角变化时:在不同故障下, $I_r I_j-U\varphi$ 模型的参数发生了变化;在不同采样步长

表1 不同仿真步长和故障下 $I_r I_j-U\varphi$ 模型的参数

Table 1 Parameters of I_{rj} - $U\varphi$ model under different simulation steps and faults					
参数	参数值				参数关系
	故障1		故障2		
	$h=0.01$ s	$h=0.02$ s	$h=0.01$ s	$h=0.02$ s	
θ_{r1}	1.9277	1.8546	1.9292	1.8659	$\sum_{i=1}^2 \theta_{ri} \approx 1$
θ_{r2}	-0.9391	-0.8933	-0.9375	-0.8968	
θ_{r3}	1.9299	2.5629	3.1614	2.9280	$\sum_{i=3}^8 \theta_{ri} \approx 0$
θ_{r4}	-3.9354	-5.2638	-6.3895	-5.9776	
θ_{r5}	2.0130	2.7281	3.2343	3.0725	
θ_{r6}	0.0005	-0.0190	-0.0390	-0.0348	
θ_{r7}	0.0026	0.0448	0.0809	0.0753	
θ_{r8}	-0.0026	-0.0241	-0.0415	-0.0392	
θ_{j1}	1.7112	1.4312	1.7463	1.8659	$\sum_{i=1}^2 \theta_{ji} \approx 1$
θ_{j2}	-0.7478	-0.5570	-0.7746	-0.8968	
θ_{j3}	1.8753	1.9272	4.7120	2.9280	$\sum_{i=3}^8 \theta_{ji} \approx 0$
θ_{j4}	-2.6436	-1.9129	-8.5351	-5.9776	
θ_{j5}	0.8184	0.1577	3.8629	3.0725	
θ_{j6}	0.1110	0.0930	0.0333	-0.0348	
θ_{j7}	-0.2230	-0.1879	-0.0688	0.0753	
θ_{j8}	0.1121	0.0950	0.0355	-0.0392	

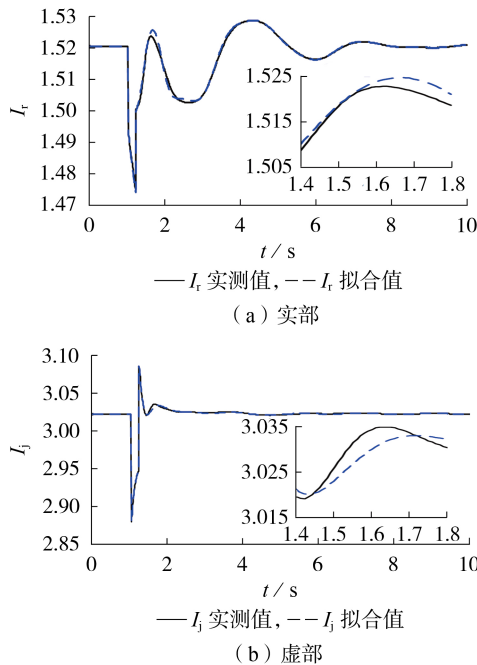


图1 $h=0.01$ s时故障1下 $I_r I_j-U\varphi$ 模型的动态响应特性

Fig.1 Dynamic response characteristics of $I_r I_j-U\varphi$ model under Fault 1 when h is 0.01 s

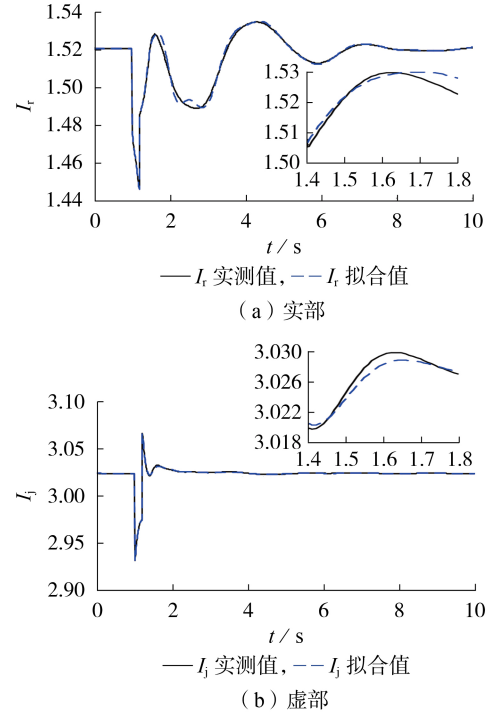


图2 $h=0.01$ s时故障2下 $I_r I_j-U\varphi$ 模型的动态响应特性

Fig.2 Dynamic response characteristics of $I_r I_j-U\varphi$ model under Fault 2 when h is 0.01 s

表2 不同采样步长下电流实部和虚部实测值与 $I_r I_j-U\varphi$ 拟合值间的RMSE

Table 2 RMSE between measured values and fitting values of $I_r I_j-U\varphi$ model for real part and imaginary part of current under different sampling steps

故障	RMSE			
	I_r	I_j	I_r	I_j
	$h=0.01$ s	$h=0.02$ s	$h=0.01$ s	$h=0.02$ s
1	5.67×10^{-4}	2.25×10^{-4}	2.05×10^{-4}	6.00×10^{-4}
2	1.21×10^{-3}	6.53×10^{-4}	6.84×10^{-4}	1.39×10^{-3}

下, $I_r I_j-U\varphi$ 模型的参数发生了变化;在不同故障和不同采样步长下, $I_r I_j-U\varphi$ 模型参数之间的关系符合本文所推导出的关系。

由表2可知:在不同采样步长下,实测值与 $I_r I_j-U\varphi$ 模型的实部和虚部RMSE虽然都很小,但发生了变化,间接反映了CLM的参数与采样步长有关,采样步长是建模过程中的关键因素。

由图1和图2可知,在故障1和故障2下,本文考虑电压相角的综合负荷广义离散等值模型的电流实部和虚部的拟合效果良好,并且动态响应一致。

3.2 $I_r I_j-U$ 模型仿真验证

基于式(12)的 $I_r I_j-U$ 模型,研究采样步长 $h=0.01$ s时2种不同故障下模型的普适性,并与3阶实用模型进行仿真对比。同时利用最小二乘法分别对 $I_r I_j-U$ 模型的参数进行辨识,结果如表3所示。基于辨识的参数,采用最小二乘法对电流实部 I_r 和电流虚部 I_j

进行拟合,结果如图 3 和附录 A 图 A3 所示。

表 3 $I_r I_j-U$ 模型参数

Table 3 Parameters of $I_r I_j-U$ model

参数	参数值		参数关系
	故障 1	故障 2	
θ_{cr1}	1.7906	1.7887	$\sum_{i=1}^2 \theta_{cr} \approx 1$
θ_{cr2}	-0.8183	-0.8158	
θ_{cr3}	3.6043	3.5044	$\sum_{i=3}^5 \theta_{cr} \approx 0$
θ_{cr4}	-6.9062	-6.6988	
θ_{cr5}	3.3357	3.2271	
θ_{ej1}	1.7109	1.7216	$\sum_{i=1}^2 \theta_{ej} \approx 1$
θ_{ej2}	-0.7373	-0.7461	
θ_{ej3}	5.5852	5.5627	$\sum_{i=3}^5 \theta_{ej} \approx 0$
θ_{ej4}	-10.2200	-10.2379	
θ_{ej5}	4.6540	4.6926	

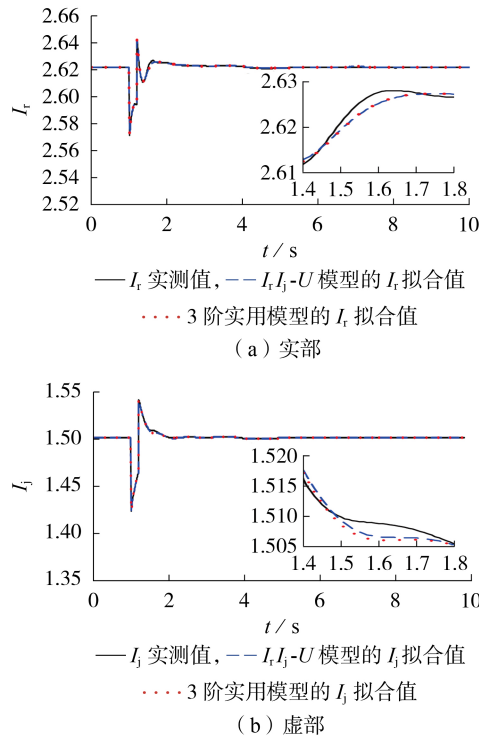


图 3 故障 1 下 $I_r I_j-U$ 模型和 3 阶实用模型的动态响应特性

Fig.3 Dynamic response characteristics of $I_r I_j-U$ model and third-order practical model under Fault 1

由表 3 可知,忽略电压相角变化时:在不同故障下, $I_r I_j-U$ 模型的参数基本保持不变; $I_r I_j-U$ 模型参数之间的关系符合本文所推导出的关系。实测数据与忽略电压相角变化的广义离散等值模型的 RMSE 和实测数据与 3 阶实用模型的 RMSE 如表 4 所示。

由表 4 可知:电流实部和虚部实测值与 $I_r I_j-U$ 模型和 3 阶实用模型拟合值间的 RMSE 均很小,这说明本文所推导的 $I_r I_j-U$ 模型具有一定的可行性;电流实部实测值与 $I_r I_j-U$ 模型拟合值间的 RMSE 大于电流实部实测值与 3 阶实用模型拟合值间的 RMSE,电流虚部实测值与 $I_r I_j-U$ 模型拟合值间的 RMSE 小于电

表 4 电流实部和虚部实测值与 $I_r I_j-U\varphi$ 模型和 3 阶实用模型拟合值间的 RMSE

Table 4 RMSE between measured values and fitting values of $I_r I_j-U\varphi$ model and third-order practical model for real part and imaginary part of current

故障	RMSE			
	I_r		I_j	
	$I_r I_j-U\varphi$ 模型	3 阶实用模型	$I_r I_j-U\varphi$ 模型	3 阶实用模型
1	3.33×10^{-4}	3.17×10^{-4}	3.23×10^{-4}	3.69×10^{-4}
2	5.22×10^{-4}	5.06×10^{-4}	5.27×10^{-4}	5.94×10^{-4}

流虚部实测值与 3 阶实用模型拟合值间的 RMSE,这说明并不是阶数越高模型的仿真精度就越高。

通过分析图 3 和附录 A 图 A3 可知,在故障 1 和故障 2 下,本文忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型的电流实部和虚部的拟合效果良好,动态响应一致。

通过对比分析表 1 和表 3 可得到如下结论。

1) 考虑电压相角变化时,在不同故障下, $I_r I_j-U\varphi$ 模型的参数发生了变化;忽略电压相角变化时,在不同故障下, $I_r I_j-U$ 模型的参数基本保持不变,且待辨识参数减少了 6 个。

2) $I_r I_j-U\varphi$ 模型和 $I_r I_j-U$ 模型参数之间的关系符合本文所推导出的关系。采样步长是建模过程中的关键因素,CLM 的系数与采样步长有关,当采样步长很小时,模型输出项的系数之和近似等于 1,模型输入项的系数之和近似等于 0。

通过对比分析表 2 和表 4 可得到如下结论。

1) 考虑电压相角变化时,在不同故障下,采用最小二乘法对本文推导的 $I_r I_j-U\varphi$ 模型进行拟合时, RMSE 在 10^{-3} 和 10^{-4} 左右;忽略电压相角变化时,在不同故障下,采用最小二乘法对本文推导的 $I_r I_j-U$ 模型进行拟合时, RMSE 均在 10^{-4} 左右。

2) 在不同采样步长下,模型参数发生了变化,但模型参数之间的关系仍符合本文所推导出的关系。

3) 电流实部和虚部实测值与 $I_r I_j-U$ 模型和 3 阶实用模型拟合值间的 RMSE 均很小,这说明本文所推导的 $I_r I_j-U$ 模型具有一定的可行性,同时,这也间接反映了并不是阶数越高模型的仿真精度就越高。

通过对比分析图 1—3 和附录 A 图 A3 可知,本文推导出的考虑 / 忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型的电流实部和虚部的拟合效果良好,动态响应一致。

进一步,采用变异系数 CV (Coefficient of Variation) 来衡量忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型的电流实部和虚部的拟合效果,如式 (17) 所示。

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{m=1}^N (C_m - \bar{C})^2}}{\bar{C}} \quad (17)$$

式中: C_v 为变异系数; N 为故障数; C_m 为第 m 个故障下的RMSE; $\bar{C}$ 为所有故障下RMSE的平均值。

随机设置不同电压跌落程度下的单相接地故障、相间接地短路故障、三相接地短路故障,最大故障数为100,计算不同故障数下的 C_v ,并使用 $C_v \leq 0.10$ 作为收敛标准。忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型的 C_v 收敛特性如图4所示。由图可知, C_v 在故障数为40左右即满足收敛要求,这表明忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型具有良好的普适性。经仿真分析发现,该模型在电压跌落程度小于10%时具有良好的适应性。

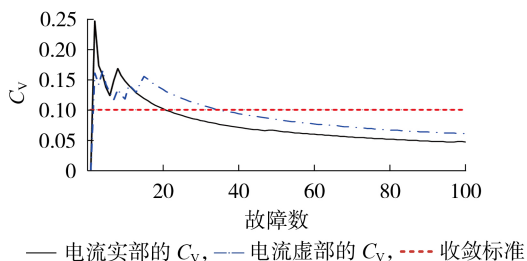


图4 100个故障下 C_v 的收敛特性

Fig.4 Convergence characteristics of C_v for 100 faults

在对新型电力系统CLM进行仿真分析时,可从综合负荷并网点获取电压和电流,建立本文所提综合负荷广义离散等值模型,辨识综合负荷广义离散等值模型参数,通过动态数据(可从广域测量系统(WAMS)中获取)进行电力系统仿真分析。当将本文建立的综合负荷广义离散等值模型应用于电力系统分析综合程序(PSASP)时,可将该模型进行变换,得到CLM电压增量和电流增量的传递函数模型,然后在PSASP中搭建综合负荷自定义模型,并设置相应的UD(User Definition)模型号,在潮流计算时通过“控制和UD功能”调用自定义模型,在暂态和稳态计算时通过“UD模型”调用自定义模型进行电力系统仿真分析。

4 结论

本文对新型电力系统下的CLM进行研究,分别解析推导了考虑电压相角和忽略电压相角变化的综合负荷广义离散等值模型,得到了一套新型电力系统CLM的解析参数,分析了模型参数间的关系,通过仿真分析了推导出的模型的适应性,得到如下结论。

1)解析推导的包含电动机负荷和静态负荷的综合负荷广义离散等值模型具有机理意义,电流实部和虚部的拟合效果良好,动态响应一致,适用于小扰动下CLM的拼接及稳定性分析。

2)在不同扰动下,综合负荷广义离散等值模型和参数具有较好的适用性,这表明模型结构和参数

在不同扰动下均有效;在不同采样步长下,模型参数发生了变化,但模型参数间的关系仍符合本文推导出的关系;综合负荷广义离散等值模型参数间的关系为模型参数的合理性提供了理论依据。

3)考虑/忽略电压相角变化的综合负荷广义离散等值模型的RMSE均很小。同时,在不同故障下,考虑电压相角变化时, I, I_j-U 模型的参数发生了变化,而忽略电压相角变化时, I, I_j-U 模型的参数基本保持不变,且待辨识参数减少了6个,因此,忽略电压相角变化的综合负荷广义离散等值模型具有一定优势。

4)通过研究不同电压跌落程度和不同故障下忽略电压相角的综合负荷广义离散等值模型的 C_v 收敛特性发现,该模型具有良好的普适性。经仿真分析发现,该模型在电压跌落程度小于10%时具有良好的适应性。

在未来的研究工作中,笔者将进一步以考虑高比例电力电子接入下新型电力系统负荷建模作为研究重点,建立适用于高比例电力电子接入下的新型电力系统负荷模型,以助力调度人员更加高效、安全、可靠地发布调度指令。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 车玉龙,王晓茹,吕晓琴,等. 基于最优箱宽直方图的牵引变电所负荷概率建模方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 186-192.
CHE Yulong, WANG Xiaoru, LÜ Xiaoqin, et al. Load probability modeling method of traction substation based on optimal bin width histogram[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 186-192.
- [2] SHEN F, JU P, SHAHIDEHPOUR M, et al. Generalized discrete-time equivalent model for the dynamic simulation of regional power grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6452-6465.
- [3] JU P, QIN C, WU F, et al. Load modeling for wide area power system [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(4): 909-917.
- [4] 王景钢,孙建华,付红军. 负荷模型简化辨识及在河南电网的仿真应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 168-171.
WANG Jinggang, SUN Jianhua, FU Hongjun. Simplified identification of load model and its application in Henan power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 168-171.
- [5] QIN C, JU P, WU F, et al. An efficient multi-area networks-merging model for power system online dynamic modeling [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 37-43.
- [6] JU P, QIN C, WU F, et al. Load modeling for wide area power system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(4): 909-917.
- [7] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 258-260.
- [8] JU P, WU F, YANG N G, et al. Dynamic equivalents of power systems with online measurements. Part 2: applications

- [J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2004, 151(2): 179-182.
- [9] 吴峰,戴小妹. 计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 1-7, 46.
WU Feng, DAI Xiaomei. Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 1-7, 46.
- [10] 鞠平,蔡昌春,曹相芹. 基于物理背景的微网总体模型[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 7-14.
JU Ping, CAI Changchun, CAO Xiangqin. General microgrid model based on physical background[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 7-14.
- [11] 张红斌,汤涌,李柏青. 差分方程负荷模型参数分散性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 1-5.
ZHANG Hongbin, TANG Yong, LI Baiqing. Study on dispersing of difference equation load model parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 1-5.
- [12] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1988: 250-253.
- [13] JU P, HANDSCHIN E, KARLSSON D. Nonlinear dynamic load modelling: model and parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1689-1697.
- [14] WU H, HU J, XIE Y. Characteristic model-based all-coefficient adaptive control method and its applications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(2): 213-221.
- [15] 吴宏鑫,王颖,解永春. 非线性系统的特征建模与控制方法[J]. 控制工程, 2002(6): 1-7.
WU Hongxin, WANG Yin, XIE Yongchun. Characteristic modeling and control method of nonlinear system[J]. Control Engineering, 2002(6): 1-7.
- [16] 罗熊,孙增圻,颜时雨. 面向复杂航天器控制应用的模糊动态特征建模与控制[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(3): 5-10, 17.
LUO Xiong, SUN Zengqi, YAN Shiyu. Complex spacecraft-oriented fuzzy dynamic characteristic modeling and control[J]. Aerospace Control and Application, 2010, 36(3): 5-10, 17.
- [17] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京:中国电力出版社, 2008: 39-48.
- [18] JU P, WU F, SHAO Z Y, et al. Composite load models based on field measurements and their applications in dynamic analysis[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(5): 724-730.
- [19] RENMU H, JIN M, HILL D J. Composite load modeling via measurement approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 663-672.
- [20] 陶苏滕,王琦,赵奇,等. 大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 182-188.
TAO Sumeng, WANG Qi, ZHAO Qi, et al. Aggregation modeling and decentralized control method of frequency response load under severe power shortage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 182-188.
- [21] ZHANG S, LIU X, CAO J, et al. Clustering based online identification of secondary dynamic parameters for measurement based composite load modeling[C]//IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [22] 鞠平,金艳,吴峰,等. 综合负荷特性的分类综合方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 64-68.
JU Ping, JIN Yan, WU Feng, et al. Studies on classification and synthesis of composite dynamic loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 64-68.
- [23] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 35-40.
- [24] SHEN F, JU P, GU L, et al. Mechanism analysis of power load using difference equation approach[C]//International Conference on Power System Technology. Wollongong, Australia: IEEE, 2016: 1-6.
- [25] CAI C, JIN Y, YU Y, et al. Load modeling with considering frequency characteristic[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Hangzhou, China: IET, 2012: 1-6.

作者简介:



沈 赋

沈 赋(1988—),男,讲师,博士,通信作者,研究方向为新型电力系统建模、电网运行与调度等(E-mail: shenfu@kust.edu.cn);
李施伟(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统建模(E-mail: li_shiwei1998@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Generalized discrete equivalent model of composite load for new-type power system

SHEN Fu¹, LI Shiwei¹, CHEN Xueou², ZHAI Suwei³, YANG Zhiwen¹, YANG Guangbing¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Training and Evaluation Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650106, China;

3. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Aiming at the composite load with different compositions and complexities in the new-type power system, a general model structure is urgently needed to meet the requirement of accuracy of online safety analysis for the new-type power system. The CLM(Composite Load Model) with motor load and static load is researched, the generalized discrete equivalent models for CLM with and without considering the variation of voltage phase angle are respectively built, the parameters of the generalized discrete equivalent models of composite load are obtained, and the inherent relations between model parameters and each component of power system and the physical characteristics among the model parameters are analyzed. The adaptability and effectiveness of the proposed model are verified by the simulation and comparison of CEPRI 36-bus system.

Key words: new-type power system; composite load; induction motor load; static load; generalized discrete equivalent model

附录 A

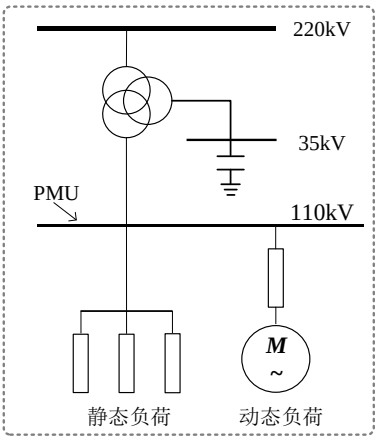


图 A1 CLM 结构图

Fig.A1 Diagram of CLM structure

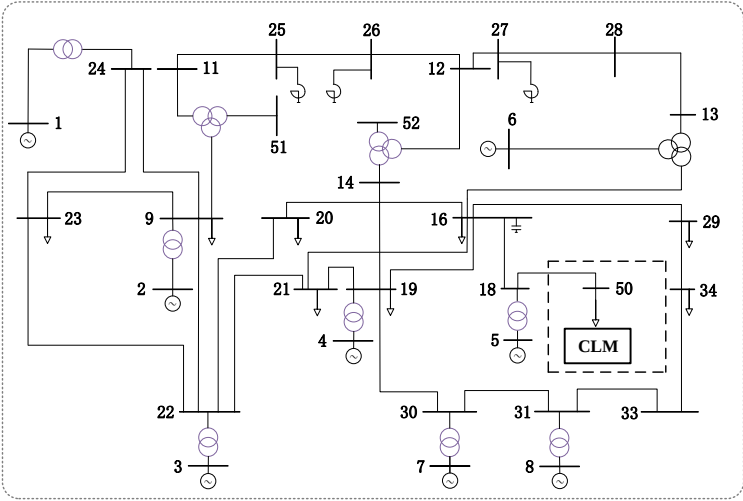
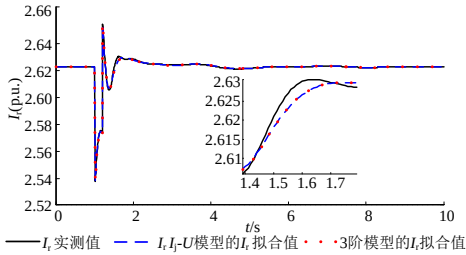
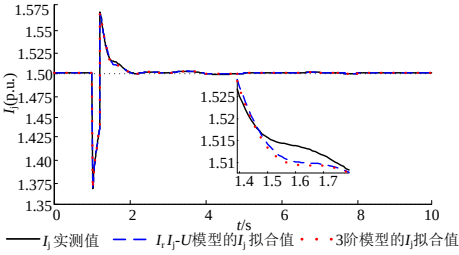


图 A2 CEPRI-36 节点系统示意图

Fig.A2 Schematic diagram of CEPRI 36-bus system



(a)实部



(b)虚部

图 A3 故障 2 下 I_r-I_f 模型和 3 阶实用模型的动态响应特性

Fig.A3 Dynamic response characteristics of I_r-I_f model and third-order practical model under Fault 2

附录 B

$$\begin{aligned}
\theta_{r1} &= \frac{(2B_j A_r + 2B_r A_j)h^2 + 8}{(4 + 2hB_j - 2hA_r - B_j A_r h^2 - B_r A_j h^2)} \\
\theta_{r2} &= \frac{(B_j A_r + B_r A_j)h^2 + 2(B_j - 2A_r)h - 4}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{r3} &= \frac{(B_j C_r + B_r C_j)h^2 + 2(B_j E_r + B_r E_j + C_r)h + 4E_r}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{r4} &= \frac{2(B_j C_r + B_r C_j)h^2 - 8E_r}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{r5} &= \frac{(B_j C_r + B_r C_j)h^2 - 2(B_j E_r + B_r E_j + C_r)h + 4E_r}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{r6} &= \frac{(B_j D_r + B_r D_j)h^2 + 2(B_j F_r + B_r F_j + D_r)h + 4F_r}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{r7} &= \frac{2(B_j D_r + B_r D_j)h^2 - 8F_r}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{r8} &= \frac{(B_j D_r + B_r D_j)h^2 - 2(B_j F_r + B_r F_j + D_r)h + 4F_r}{(-B_j A_r - B_r A_j)h^2 + 2(B_j - A_r)h + 4} \\
\theta_{j1} &= \frac{2(B_r A_j + B_j A_r)h^2 + 8}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j2} &= \frac{(B_r A_j + B_j A_r)h^2 + 2(B_r - 2A_j)h - 4}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j3} &= \frac{(B_r C_j + B_j C_r)h^2 + 2(B_r E_j + B_j E_r + C_j)h + 4E_j}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j4} &= \frac{2(B_r C_j + B_j C_r)h^2 - 8E_j}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j5} &= \frac{(B_r C_j + B_j C_r)h^2 - 2(B_r E_j + B_j E_r + C_j)h + 4E_j}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j6} &= \frac{(B_r D_j + B_j D_r)h^2 + 2(B_r F_j + B_j F_r + D_j)h + 4F_j}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j7} &= \frac{2(B_r D_j + B_j D_r)h^2 - 8F_j}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4} \\
\theta_{j8} &= \frac{(B_r D_j + B_j D_r)h^2 - 2(B_r F_j + B_j F_r + D_j)h + 4F_j}{(-B_r A_j - B_j A_r)h^2 + 2(B_r - A_j)h + 4}
\end{aligned}$$

附录 C

$$\begin{aligned}
\theta_{cr1} &= \frac{2(B_r A_j - A_r B_j)h^2 + 8}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \\
\theta_{cr2} &= \frac{(B_r A_j - A_r B_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h - 4}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \\
\theta_{cr3} &= \frac{(B_r C_j - B_j C_r)h^2 - 2(GB_j + B_r B - C_r)h + 4G}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \\
\theta_{cr4} &= \frac{2(B_r C_j - B_j C_r)h^2 - 8G}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4} \\
\theta_{cr5} &= \frac{(B_r C_j - B_j C_r)h^2 + 2(GB_j + B_r B - C_r)h + 4G}{(A_r B_j - B_r A_j)h^2 - 2(A_r + B_j)h + 4}
\end{aligned}$$

$$\theta_{\text{q1}} = \frac{2(A_{\text{j}}B_{\text{i}} - B_{\text{j}}A_{\text{i}})h^2 + 8}{(A_{\text{i}}B_{\text{j}} - B_{\text{i}}A_{\text{j}})h^2 - 2(A_{\text{i}} + B_{\text{j}})h + 4}$$

$$\theta_{\text{q2}} = \frac{(A_{\text{j}}B_{\text{i}} - B_{\text{j}}A_{\text{i}})h^2 - 2(B_{\text{j}} + A_{\text{i}})h - 4}{(A_{\text{i}}B_{\text{j}} - B_{\text{i}}A_{\text{j}})h^2 - 2(A_{\text{i}} + B_{\text{j}})h + 4}$$

$$\theta_{\text{q3}} = \frac{(A_{\text{j}}C_{\text{i}} - A_{\text{i}}C_{\text{j}})h^2 - 2(-BA_{\text{i}} - GA_{\text{j}} - C_{\text{j}})h - 4B}{(A_{\text{i}}B_{\text{j}} - B_{\text{i}}A_{\text{j}})h^2 - 2(A_{\text{i}} + B_{\text{j}})h + 4}$$

$$\theta_{\text{q4}} = \frac{2(A_{\text{j}}C_{\text{i}} - A_{\text{i}}C_{\text{j}})h^2 + 8B}{(A_{\text{i}}B_{\text{j}} - B_{\text{i}}A_{\text{j}})h^2 - 2(A_{\text{i}} + B_{\text{j}})h + 4}$$

$$\theta_{\text{q5}} = \frac{(A_{\text{j}}C_{\text{i}} - A_{\text{i}}C_{\text{j}})h^2 + 2(-BA_{\text{i}} - GA_{\text{j}} - C_{\text{j}})h - 4B}{(A_{\text{i}}B_{\text{j}} - B_{\text{i}}A_{\text{j}})h^2 - 2(A_{\text{i}} + B_{\text{j}})h + 4}$$