

电力电子接口负荷的动静综合模型

鞠平^{1,2}, 杨杰¹, 金宇清¹, 李建华³

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120)

摘要:近年来,越来越多的用电设备通过电力电子装置接入电网,对负荷特性产生显著影响,而传统负荷模型中缺乏对电力电子接口负荷的描述。为此,提出描述电力电子接口负荷的动静综合模型,该模型是一种非机理模型,其建立不依赖于对负荷实际工作机理的详细描述,不同类型的电力电子接口负荷可以采用相同的模型结构,这使得模型简洁,参数少,且具有较好的适应性。推导获得动静综合模型的方程,提出对模型中静态和动态参数分开确定的方法。利用典型电力电子接口负荷的实测数据获得动静综合模型,验证结果表明,所提模型能够有效描述电力电子接口负荷。

关键词:负荷建模;电力电子接口;非机理模型;参数辨识

中图分类号:TM743

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308027

0 引言

近年来,随着电力电子技术的不断发展和用电设备的需求变化,大量用电设备通过电力电子装置接入电网^[1-3],本文将这类负荷称为电力电子接口负荷,为描述方便起见,将其简称为E负荷。根据用电设备中是否包含电动机,E负荷可以分为旋转类和非旋转类负荷。常见的旋转类E负荷主要包括变频空调、变频电机等,其共性技术是变频调速系统。常见的非旋转类E负荷主要包括LED灯、各种充电设备等,其共性技术是开关电源模块。

由于E负荷的特性与常规负荷的特性存在明显差异,为此需要深入研究能够描述E负荷特性的模型。负荷模型作为电力系统模型的一个重要组成部分,对电力系统仿真结果具有重要影响^[4-5]。针对负荷成分的新变化,学者对相关的建模和参数辨识开展了研究^[6-8]。负荷模型可以分为机理模型和非机理模型2类。

机理模型是根据负荷所遵循的物理定律,获得一组描述负荷特性的方程。我国常用的机理模型由静态负荷和感应电动机组成,包括间接考虑配电网阻抗的经典负荷模型(classic load model, CLM)和直接考虑配电网阻抗的综合负荷模型(synthesis load model, SLM)^[9-10]。国际上受到广泛关注的是西部电力协调委员会(Western Electricity Coordinating Council, WECC)负荷模型,基本模型由静态负荷和几种电动机经过等效阻抗接入负荷母线。近年来,

随着分布式电源和E负荷比例的逐步提高,这些模型得到了进一步拓展^[11-14]。此外,由于大量感应电动机通过变频器接入电网,文献[15]综合考虑整流、滤波、逆变等环节以及感应电动机,建立简化变频电机模型;在此基础上,文献[16]进一步将变频电机模型与传统的恒定阻抗、恒定电流、恒定功率模型和感应电动机模型并联构成负荷模型。机理模型物理概念明确,易于被工程人员理解和使用。当负荷群中E负荷成分比较单一且特性相近时,这种模型是合适的。然而,当E负荷类型不止1种或者E负荷间特性相差较大时,就难以仅用1种等效机理模型进行描述。若采用几种机理模型的组合,则一方面会增加模型结构的复杂性,另一方面会因未知参数的增多而导致参数估计困难。

鉴于机理模型的缺陷,可以考虑采用非机理模型来描述E负荷的输入/输出特性。非机理模型的建立不依赖于对负荷实际工作机理的详细描述,不同类型的E负荷有可能采用相同形式的非机理模型,因而非机理模型具有较好的适应性。文献[17]基于大扰动数据,提出一种分段指数恢复模型,考虑E负荷在发生电压跌落和电压恢复时刻的动态特性,但该模型仅计及有功功率的拟合,无法适用于任意电压扰动,也无法反映静态阻抗特性。文献[18]提出一种变频设备模型,该模型包含稳态部分、向上的冲击和向下的冲击,使用一阶传递函数来描述冲击,同时考虑设备的脱机电压,但该模型需要确定8个参数,无法直接连接电网仿真系统。总体而言,E负荷的非机理模型非常必要,但相关研究工作处于起步阶段。

本文首先构建E负荷的动静综合模型(composite dynamic-static model, CDSM)方程,然后提出静态和动态参数的确定方法,最后通过实测数据验证

收稿日期:2023-07-24;修回日期:2023-08-23

在线出版日期:2023-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004,U2066601)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51837004,U2066601)

模型的有效性。

1 E 负荷 CDSM 的方程

笔者于1989年提出离散形式的CDSM^[19],后来将其扩展为连续形式^[20]。CDSM的基本思路是:将动态和静态模型统一于一体,在静态条件下模型自动转化为静态模型,在动态条件下则在静态模型的基础上加上动态补偿增量。CDSM结构如图1所示,图中: U 为输入变量,表示电压、频率等; Y 为输出变量,表示有功功率、无功功率等; $F_s(\cdot)$ 为静态模型的函数; $g(\cdot)$ 为静态增益的函数; $H(s)$ 为动态环节的拉氏传递函数。由图可知,CDSM是静态模型与动态补偿模型的并联,动态补偿模型是静态增益与动态环节的串联。

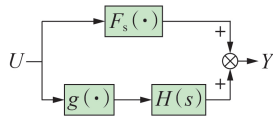


图1 CDSM结构图

Fig.1 Structure diagram of CDSM

结合E负荷的特殊性,进行如下处理:输入变量只考虑电压;输出变量同时考虑有功功率和无功功率,而且两者时间常数相同;静态模型采用幂函数,静态增益采用线性函数,以有功功率为例,两函数如式(1)所示;为了使模型在静态条件下转化为静态模型,在静态条件下动态环节应该自动断开,按照拉氏变换终值定理,静态条件相当于 $s \rightarrow 0$,则动态环节须满足 $H(0)=0$,而满足该条件最简单的一阶动态环节如式(2)所示。

$$F_s(U) = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_u}, \quad g(U) = P_0 K_p \left(\frac{U}{U_0} \right) \quad (1)$$

式中: P_0 为初始有功功率稳态值; U_0 为初始电压稳态值; p_u 为静态有功电压特征系数; K_p 为与有功功率对应的静态增益函数中的系数。

$$H(s) = s / (Ts + 1) \quad (2)$$

式中: T 为时间常数。

式(2)分母描述了E负荷的惯性,分子描述了动态补偿。若E负荷特性复杂,则应该采用高于一阶的动态环节。

由此可得E负荷的CDSM为:

$$\begin{cases} P = P_s + P_d \\ Q = Q_s + Q_d \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_s = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_u}, & P_d = H(s) P_0 K_p \left(\frac{U}{U_0} \right) \\ Q_s = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_u}, & Q_d = H(s) Q_0 K_q \left(\frac{U}{U_0} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P 、 Q 分别为有功功率和无功功率响应; P_s 、 Q_s

分别为有功功率和无功功率响应中的静态部分; P_d 、 Q_d 分别为有功功率和无功功率响应中的动态部分; Q_0 为初始无功功率稳态值; q_u 为静态无功电压特征系数; K_q 为与无功功率对应的静态增益函数中的系数。

将式(3)和式(4)合并为:

$$\begin{cases} P = P_0 \left[\left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_u} + H(s) K_p \left(\frac{U}{U_0} \right) \right] \\ Q = Q_0 \left[\left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_u} + H(s) K_q \left(\frac{U}{U_0} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

为方便起见,令:

$$\begin{cases} U_* = \frac{U}{U_0}, & P_* = \frac{P}{P_0}, & Q_* = \frac{Q}{Q_0} \\ \Delta P_{d*} = P_* - U_*^{p_u}, & \Delta Q_{d*} = Q_* - U_*^{q_u} \end{cases} \quad (6)$$

则有:

$$\begin{cases} \Delta P_{d*} = \frac{K_p s}{Ts + 1} U_* \\ \Delta Q_{d*} = \frac{K_q s}{Ts + 1} U_* \end{cases} \quad (7)$$

对应的微分方程形式为:

$$\begin{cases} T \frac{d\Delta P_{d*}}{dt} = -\Delta P_{d*} + K_p \frac{dU_*}{dt}, & P = P_0 \left[\left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_u} + \Delta P_{d*} \right] \\ T \frac{d\Delta Q_{d*}}{dt} = -\Delta Q_{d*} + K_q \frac{dU_*}{dt}, & Q = Q_0 \left[\left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_u} + \Delta Q_{d*} \right] \end{cases} \quad (8)$$

若近似假设静态幂指数为0,即静态特性近似采用恒功率模型,则有:

$$\begin{cases} \Delta P_{d*} = P_* - 1 = \Delta P_* \\ \Delta Q_{d*} = Q_* - 1 = \Delta Q_* \end{cases} \quad (9)$$

对应的微分方程形式为:

$$\begin{cases} T \frac{d\Delta P_*}{dt} = -\Delta P_* + K_p \frac{dU_*}{dt}, & P = P_0 (1 + \Delta P_*) \\ T \frac{d\Delta Q_*}{dt} = -\Delta Q_* + K_q \frac{dU_*}{dt}, & Q = Q_0 (1 + \Delta Q_*) \end{cases} \quad (10)$$

需要说明的是:方程式(8)中的静态模型是非线性的,因此整体是非线性的动态模型;方程式(10)中的静态模型为恒功率,即常数,因此整体是线性的动态模型;将CDSM应用于现有仿真软件时,可采用自定义模型方式实现,将其输出的有功功率 P 和无功功率 Q 转换为输出电流进行并网,在不同的仿真软件中实现方式可能有所不同,这里不再赘述。

2 E 负荷 CDSM 的参数

上述模型一共有5个参数,分为2组:一组是2个静态模型参数,即幂指数 p_u 、 q_u ,其物理涵义是静态条件下E负荷功率对电压的灵敏度;另一组是3个动态补偿模型参数,时间常数 T 的物理涵义是反

映E负荷功率变化快慢的等效惯性,系数 K_p 、 K_q 的物理涵义是电压变化瞬间负荷功率产生冲击的程度。

下面先确定静态参数,再确定动态参数,不妨称之为“先静后动”方法。

2.1 静态幂指数的近似公式

如前文所述,在静态条件下模型自动成为静态模型,即:

$$P=P_s=P_0\left(\frac{U}{U_0}\right)^{p_u}, Q=Q_s=Q_0\left(\frac{U}{U_0}\right)^{q_u} \quad (11)$$

由此可得:

$$p_u = \frac{d(P/P_0)}{d(U/U_0)} \Big|_{U=U_0}, q_u = \frac{d(Q/Q_0)}{d(U/U_0)} \Big|_{U=U_0} \quad (12)$$

由此可见,静态幂指数即静态特征系数,反映了静态灵敏度。

若电压扰动是阶跃型的,则可以测到扰动前后2个稳态点数据。在电压前稳态阶段时,通过对若干点数据取平均值得到稳态点 U_0 、 P_0 、 Q_0 ,在电压阶跃进入后稳态阶段时,通过对若干点数据取平均值得到另一个稳态点 U_1 、 P_1 、 Q_1 ,则近似公式为:

$$p_u \approx \frac{P_1/P_0 - 1}{U_1/U_0 - 1}, q_u \approx \frac{Q_1/Q_0 - 1}{U_1/U_0 - 1} \quad (13)$$

2.2 静态幂指数的优化公式

若有多个不同的稳态测量点,明显偏离额定值的测量点共有 N 个,这里用下标 0 表示额定值附近的测量点,以有功功率为例,则有:

$$P_{*i} = P_i/P_0 = U_{*i}^{p_u}, \ln P_{*i} = p_u \ln U_{*i} \quad (14)$$

式中:下标“ i ”表示第 i 个测量点。

参数优化问题为:

$$\min_{p_u} J = \sum_{i=1}^N (\ln P_{*i} - p_u \ln U_{*i})^2 \quad (15)$$

式中: J 为待优化目标函数值。

将 J 对 p_u 求导,并令其值为0,可得:

$$\frac{\partial J}{\partial p_u} = \sum_{i=1}^N [2(\ln P_{*i} - p_u \ln U_{*i})(-\ln U_{*i})] = 0 \quad (16)$$

由此可得 p_u 的优化解为:

$$p_u = \left(\sum_{i=1}^N \ln P_{*i} \ln U_{*i} \right) / \sum_{i=1}^N (\ln U_{*i})^2 \quad (17)$$

类似可得:

$$q_u = \left(\sum_{i=1}^N \ln Q_{*i} \ln U_{*i} \right) / \sum_{i=1}^N (\ln U_{*i})^2 \quad (18)$$

2.3 动态环节的参数辨识

在获得2个静态参数 p_u 、 q_u 后,将其代入CDSM,根据电压变化时E负荷的动态响应,辨识其他3个动态参数 T 、 K_p 、 K_q 。优化的目标函数为:

$$E = \sum_{i=1}^M [(P(i) - P_c(i))^2 + (Q(i) - Q_c(i))^2] \quad (19)$$

式中: E 为误差指标; M 为采样点数; $P(i)$ 、 $Q(i)$ 分别为第 i 个采样点有功功率和无功功率的测量值;

$P_c(i)$ 、 $Q_c(i)$ 分别为第 i 个采样点有功功率和无功功率的计算值。

优化方法采用粒子群优化算法,限于篇幅,本文不再赘述。

3 E负荷CDSM的验证

3.1 实验情况

为了验证CDSM的有效性,选择2种典型的E负荷进行实测和对比:一种是典型的非旋转类E负荷,即LED灯;另一种是典型的旋转类E负荷,即变频空调。施加几种不同大小的电压扰动,实测得到负荷的有功功率和无功功率响应,如图2—6所示(图中电压、有功功率、无功功率均为标么值)。由图可知,电压跌落瞬间,功率均有一个快速的跌落或上升,之后功率逐步恢复到平稳状态。

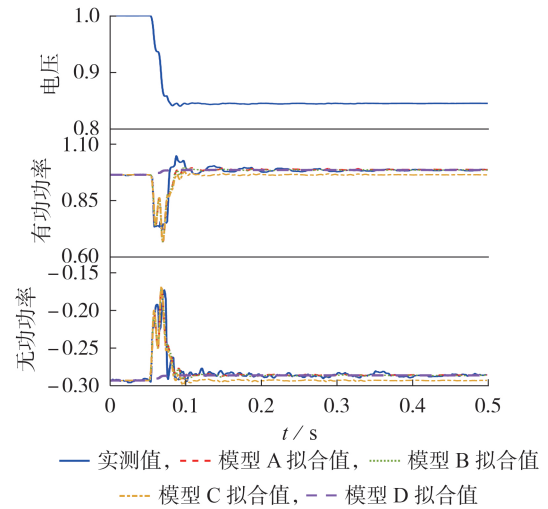


图2 LED灯电压跌落15.5%时的拟合效果

Fig.2 Fitting effect when voltage sag of LED lamp is 15.5%

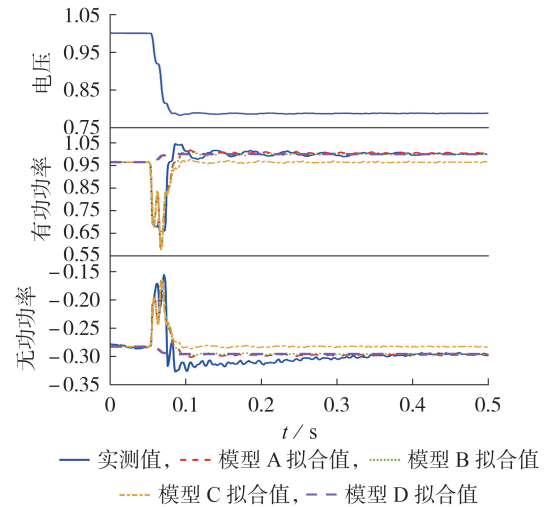


图3 LED灯电压跌落21.2%时的拟合效果

Fig.3 Fitting effect when voltage sag of LED lamp is 21.2%

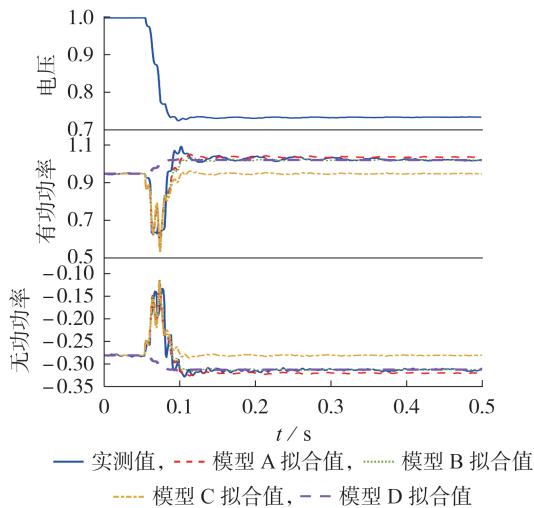


图4 LED灯电压跌落26.6%时的拟合效果

Fig.4 Fitting effect when voltage sag of LED lamp is 26.6%

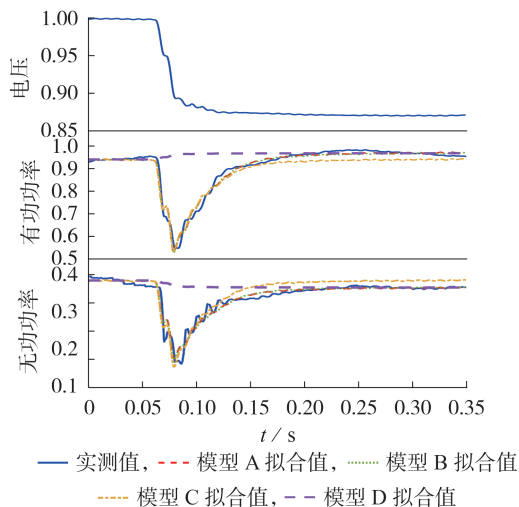


图5 变频空调电压跌落12.9%时的拟合效果

Fig.5 Fitting effect when voltage sag of inverter air conditioner is 12.9%

3.2 模型参数

这里对比3种不同参数的CDSM,动态补偿模型均相同,而静态模型不同:模型A,静态模型采用幂函数模型,其幂指数采用式(13)获得;模型B,静态特性采用幂函数模型,其幂指数采用式(17)和式(18)获得;模型C,静态模型采用恒功率模型,其幂指数为0。在计算模型A和模型B的幂指数时,采用电压跌落前后的2个稳态值。

根据LED灯和变频空调的实测数据,按照第2章方法获得3种模型的参数,结果如表1和表2所示。由表1和表2可知:在不同电压跌落程度下辨识得到的参数比较一致,这表明辨识方法有效;模型A和模型B的幂指数 p_u 、 q_u 均较小,但并不很接近于0;惯性时间常数 T 总体而言均较小,非旋转类E负荷的 T 小

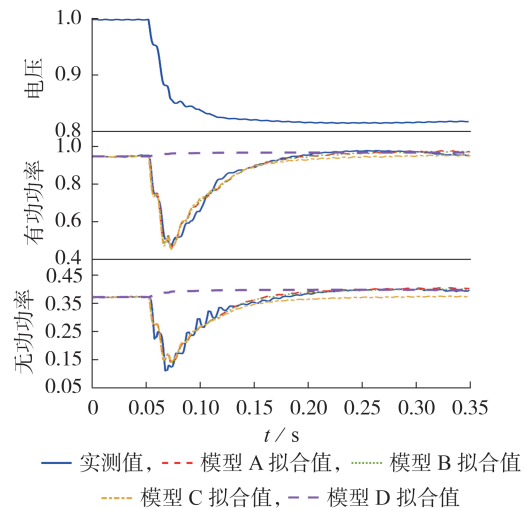


图6 变频空调电压跌落18.2%时的拟合效果

Fig.6 Fitting effect when voltage sag of inverter air conditioner is 18.2%

表1 LED灯的模型参数

Table 1 Model parameters of LED lamp

模型	电压跌落 / %	p_u	q_u	T/s	K_p	K_q
A	15.5	-0.142 1	0.148 4	0.004 2	0.031 7	0.037 7
	21.2	-0.174 4	-0.215 9	0.004 4	0.032 4	0.034 2
	26.6	-0.287 4	-0.422 0	0.005 8	0.033 9	0.047 3
B	15.5	-0.129 4	0.138 2	0.004 2	0.031 4	0.037 8
	21.2	-0.152 4	-0.187 9	0.004 3	0.031 9	0.033 6
	26.6	-0.238 2	-0.344 1	0.005 5	0.032 4	0.044 6
C	15.5	0	0	0.003 9	0.028 9	0.039 4
	21.2	0	0	0.003 8	0.028 4	0.029 5
	26.6	0	0	0.004 4	0.025 8	0.034 5

表2 变频空调的模型参数

Table 2 Model parameters of inverter air conditioner

模型	电压跌落 / %	p_u	q_u	T/s	K_p	K_q
A	12.9	-0.222 5	0.375 6	0.025 1	0.148 4	0.161 4
	18.2	-0.117 6	-0.376 0	0.028 3	0.155 0	0.201 3
B	12.9	-0.204 8	0.359 6	0.024 8	0.146 6	0.161 8
	18.2	-0.105 4	-0.329 5	0.027 8	0.153 1	0.196 2
C	12.9	0	0	0.022 6	0.129 1	0.178 8
	18.2	0	0	0.024 5	0.139 0	0.163 9

于旋转类E负荷1个数量级;系数 K_p 和 K_q 总体而言均较小,非旋转类E负荷的 K_p 和 K_q 小于旋转类E负荷1个数量级。

3.3 模型拟合

考虑到E负荷的惯性时间常数较小,为了检验是否可以忽略不计,设置模型D,不考虑动态补偿部分,而完全采用静态模型,其中幂指数与模型B相同。以实测的电压作为输入,分别采用模型A—D计算有功功率和无功功率的动态响应,拟合曲线如图2—6所示,拟合误差如表3和表4所示。表中, E_p 、 E_q 分别为有功功率和无功功率曲线的均方根误

差(标么值),如式(20)所示; E_{p_pp} 和 E_{q_pp} 分别为有功功率和无功功率均方根误差的百分比,如式(21)所示。

$$E_p = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P(i) - P_c(i))^2}, E_q = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (Q(i) - Q_c(i))^2} \quad (20)$$

$$E_{p_pp} = \frac{E_p}{|P_0|} \times 100\%, E_{q_pp} = \frac{E_q}{|Q_0|} \times 100\% \quad (21)$$

表3 LED灯的拟合误差

Table 3 Fitting error of LED lamp

模型	电压跌落 / %	E_p	E_q	E_{p_pp}	E_{q_pp}
A	15.5	0.0203	0.0082	2.1041	2.7901
	21.2	0.0236	0.0136	2.4464	4.8108
	26.6	0.0277	0.0124	2.9328	4.4018
B	15.5	0.0204	0.0082	2.1144	2.7901
	21.2	0.0237	0.0145	2.4567	5.1291
	26.6	0.0273	0.0112	2.8904	3.9759
C	15.5	0.0293	0.0107	3.0369	3.6407
	21.2	0.0425	0.0233	4.4055	8.2420
	26.6	0.0765	0.0319	8.0995	11.3241
D	15.5	0.0475	0.0177	4.9233	6.0225
	21.2	0.0619	0.0229	6.4165	8.1005
	26.6	0.0703	0.0289	7.4431	10.2591

表4 变频空调的拟合误差

Table 4 Fitting error of inverter air conditioner

模型	电压跌落 / %	E_p	E_q	E_{p_pp}	E_{q_pp}
A	12.9	0.0162	0.0121	1.7238	3.1478
	18.2	0.0192	0.0129	2.0285	3.4687
B	12.9	0.0164	0.0121	1.7451	3.1478
	18.2	0.0194	0.0124	2.0497	3.3342
C	12.9	0.0276	0.0202	2.9368	5.2549
	18.2	0.0262	0.0210	2.7681	5.6467
D	12.9	0.1098	0.0504	11.6833	13.1113
	18.2	0.1480	0.0749	15.6366	20.1398

由图2—6以及表3和表4可知:模型A和B的输出与实测曲线很接近,这是由于这2种模型中的静态特性均采用幂函数模型,考虑了电压变化对负荷功率稳态和动态的影响;模型C中的静态特性以恒功率模型表示,在电压跌落后的稳态期间存在误差,尤其是无功功率的误差明显;模型D不考虑动态特性而完全采用静态模型,动态误差显著增大;模型A和B的拟合误差相近,明显小于模型C和D的误差,这表明采用幂函数模型表示静态特性的CDSM能较好地描述E负荷的特性,验证了本文模型的有效性。

4 结论

本文构建描述E负荷特性的CDSM,提出模型参数的确定方法,通过实测数据验证了模型和方法的有效性。结论如下。

1)E负荷的CDSM方程形式简洁,输入变量为电压,输出变量为有功功率和无功功率,易于工程人员理解和使用。

2)E负荷的CDSM参数涵义明确,“先静后动”的参数确定方法易于实现和使用。

3)E负荷的静态特性采用恒功率进行描述具有一定的近似性,而采用幂函数模型进行描述比较准确。

4)旋转类E负荷的惯性时间常数为数十毫秒级,动态过程为数百毫秒级,一般应该考虑其动态特性;非旋转类E负荷的惯性时间常数为数毫秒级,动态过程为数十毫秒级,在较长时间尺度动态过程中可以忽略其动态特性,但对于电磁暂态短时间尺度动态过程一般应该考虑其动态特性。

需要指出的是,本文中E负荷的CDSM适用于一般电压扰动(如25%以内)。对于更大范围的电压扰动,需要考虑非线性静态增益、负荷内部的保护脱网等因素,这有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [2] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.
- [3] 朱蜀,刘开培,秦亮,等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962.
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962.
- [4] 郭琦,卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [5] 沈沉,陈颖,黄少伟,等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 75-86.
SHEN Chen, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 75-86.
- [6] 沈赋,李施伟,陈雪鸥,等. 新型电力系统综合负荷广义离散等值模型[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 18-24.
SHEN Fu, LI Shiwei, CHEN Xueou, et al. Generalized discrete equivalent model of composite load for new-type power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 18-24.
- [7] 吴沛萱,张欣然,周晋航,等. 基于类噪声信号的等值负荷惯量

- 两阶段辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 57-63.
- WU Peixuan, ZHANG Xinran, ZHOU Jinhang, et al. Ambient signal-based two-stage equivalent load inertia identification method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 57-63.
- [8] 孟贤, 沈一鸣, 陈宇杰, 等. 基于实测数据跳变及稳态点的负荷模型参数快速辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 11-17.
- MENG Xian, SHEN Yiming, CHEN Yujie, et al. Fast identification method for load model parameters based on jumping and steady-state points of measured data [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 11-17.
- [9] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
- TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network [J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 34-38.
- [10] 陈谦, 孙建波, 蔡敏, 等. 考虑配电网综合负荷模型的参数确定[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 45-50.
- CHEN Qian, SUN Jianbo, CAI Min, et al. Parameters determination of synthesis load model considering distribution network connection [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 45-50.
- [11] WANG X N, WANG Y S, SHI D, et al. Two-stage WECC composite load modeling: a double deep Q-learning networks approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4331-4344.
- [12] WANG C, WANG Z Y, WANG J H, et al. SVM-based parameter identification for composite ZIP and electronic load modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 182-193.
- [13] BU F K, MA Z X, YUAN Y X, et al. WECC composite load model parameter identification using evolutionary deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5407-5417.
- [14] MA Z X, WANG Z Y, WANG Y S, et al. Mathematical representation of WECC composite load model [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 1015-1023.
- [15] PANASETSKY D, OSAK A, SIDOROV D, et al. Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control [J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(27): 451-454.
- [16] LIN Y, WANG Y S, WANG J H, et al. Tensor-based parameter reduction of dynamic load models with variable frequency drive [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1091-1101.
- [17] RYLANDER M, GRADY W M, ARAPOSTATHIS A, et al. Power electronic transient load model for use in stability studies of electric power grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 914-921.
- [18] MITRA P, RAMASUBRAMANIAN D, GAIKWAD A, et al. Modeling the aggregated response of variable frequency drives (VFDs) for power system dynamic studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2631-2641.
- [19] 鞠平, 马大强. 电力负荷的新模型及动静态参数的同时辨识 [J]. 控制与决策, 1989, 4(2): 20-23, 29.
- JU Ping, MA Daqiang. Composite dynamic-static models of electric power loads [J]. Control and Decision, 1989, 4(2): 20-23, 29.
- [20] 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.

作者简介:

鞠平(1962—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模、分析与控制等(E-mail: pju@hhu.edu.cn);

杨杰(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力负荷建模(E-mail: yangjie21@hhu.edu.cn);

金宇清(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模、分析与控制等(E-mail: jyq16@hhu.edu.cn);

李建华(1978—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统建模与仿真、新能源运行控制与管理等(E-mail: li_jianhua@ec.sgcc.com.cn)。

(编辑 王锦秀)

Composite dynamic-static model of power electronic interfaced loads

JU Ping^{1,2}, YANG Jie¹, JIN Yuqing¹, LI Jianhua³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: In recent years, more and more electrical equipments are connected to the power grid through power electronic devices, which significantly impacts load characteristics. However, the traditional load models lack the description of power electronic interfaced loads. Therefore, a composite dynamic-static model is proposed to describe the power electronic interfaced loads. The model is a non-mechanism model, and its establishment does not rely on detailed description of the actual operation mechanism of the loads. Different types of power electronic interfaced loads can adopt the same model structure, which makes the model concise with fewer parameters and has better adaptivity. The equations of composite dynamic-static model are derived, and a method is proposed to separately determine the static and dynamic parameters in the model. The composite dynamic-static model is obtained by the measured data of typical power electronic interfaced loads, and the verification results show that the proposed model can effectively describe the power electronic interfaced loads.

Key words: load modeling; power electronic interface; non-mechanism model; parameter identification