

「电网」

综合负荷建模的研究现状

文/国网宁夏电力公司宁东供电公司 冯学峰 吕琨璐

随着电网的快速发展，分布式电源不断接入，电网遍布分布式电源，电网结构也随之变化，电网潮流流向有时是从负荷流向母线，电网综合负荷特性必然受到影响，原来的负荷模型已不能满足所在地区的负荷特性。首先阐述了负荷模型的分类，其次总结了国内外常用负荷模型结构、负荷建模方法，最后指出了负荷建模的发展方向。

一般地，分布式发电技术在用户负荷附近设置发电单元来提供电力，分布式电源具有清洁、投资少和安装灵活等优点，能够改善传统集中式电网的性能。由于国家政策的支持以及分布式电源技术的快速发展，分布式电源不断接入，分布式电源容量不断增大，电网结构也随之变化，电网潮流流向不再是由母线流向负荷，用户互联、遍布电源逐渐成为电网的新特点，电网综合负荷模型可能需要根据当地的分布式电源情况重新建立，那么综合负荷建模方法成为了一个比较重要的研究课题。

负荷模型的分类

电力系统负荷由各种各样的用电设备、无功补偿设备、输电线路和变电设备等组成，这些设备因自身特点、地域不同和负荷大小各异而运行特性显得各不相同，地理位置的分散性导致这些设备距离变电站的电气距离千差万别。为了比较接近实际情况地描述电力设备的负荷特性，电力系统仿真所需的负荷模型，一般分为静态负荷模型和动态负荷模型两大类。静态负荷是指没有旋转元件的电力设备，如电弧炉、烹饪电器、电暖气和各种灯具等；动态负荷是指含有旋转元件

的电力设备，如电风扇、洗衣机、有轨电车和电动机等。

1. 静态负荷模型

静态负荷模型通常采用数学方程来描述，负荷功率随负荷电压、频率的变化而变化，这是静态负荷模型主要描述的。静态负荷模型的数学方程主要有幂函数方程、多项式方程。

多项式模型按照负荷的变化特性，在电力系统仿真计算中，一般将恒定阻抗（ Z ）、恒定电流（ I ）、恒定功率（ P ）三类负荷组合到一起作为变电站母线的综合负荷模型。负荷特性有时不得不考虑其频率特性，频率影响因子应加入到多项式模型中。常用的多项式模型如式（1）所示。

$$\begin{cases} P = P_0[a_p(U/U_0)^2 + b_p(U/U_0) + c_p](1 + L_{DP}\Delta f) \\ Q = Q_0[a_q(U/U_0)^2 + b_q(U/U_0) + c_q](1 + L_{DQ}\Delta f) \end{cases} \quad (1)$$

式中， P 为负荷的实际有功功率； Q 为负荷的实际无功功率； P_0 是负荷在电压为 U_0 时的有功功率； Q_0 是负荷在电压为 U_0 时的无功功率； a_p 、 b_p 、 c_p 和 a_q 、 b_q 、 c_q 为各类负荷所占的百分比（ $a_p + b_p + c_p = 1$ ， $a_q + b_q + c_q = 1$ ）； U 为实际电压； U_0 为基准电压； L_{DP} 为有功功率的频率影响因子； L_{DQ} 为无功功率的频率影响因子。

幂函数模型为

$$\begin{cases} P = P_0(U/U_0)^{P_v}(f/f_0)^{P_f} \\ Q = Q_0(U/U_0)^{Q_v}(f/f_0)^{Q_f} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_v 、 Q_v 分别是有功功率和无功功率的电压特性因子; P_f 、 Q_f 分别是有功功率和无功功率的频率特性因子。

在一定的电压变化范围内, 数学方程能够比较接近地描述大部分负荷静态特性, 基于电力系统潮流计算的稳态分析是数学方程主要应用所在。

2. 动态负荷模型

动态负荷模型旨在描述电力系统电压、频率快速变化而引起的负荷变化过程的动态特性。按照结构形式的不同, 动态模型分为非机理模型、机理模型。

非机理模型是根据系统辨识理论搭建起来的, 详细描述负荷电压、频率和负荷功率的关系, 而得出合理的数学模型。非机理模型加大了对负荷动态特征的描述力度, 而忽略了模型参数的物理意义, 导致在实际应用中较少。

机理模型一般就是感应电动机模型, 综合负荷动态特性通常用感应电动机模型和静态负荷模型的并联来描述。机理模型的优点是, 参数的物理意义明确, 暂态仿真中被大量应用。分布式电源的大量接入, 导致感应电动机模型不能更好地描述综合负荷特性。

国内外常用的负荷模型结构

电力系统负荷的随机性、复杂性, 几乎不可能建立一个通用的数学负荷模型。国内外各个学术组织, 或者采用的模型结构不同, 或者采用的模型参数不同。

日本电气学会主张, 标准负荷模型, 对于无功负荷, 使用100%恒阻抗模型; 母线电压在 $0.75U_N$ 左右时, 使用恒阻抗模型; 母线电压在 U_N 左右时, 使用恒电流模型。

加拿大安大略水电局, 在电力系统分析计算中, 所用的静态符合模型, 以50%恒电流模型+50%恒阻抗模型来描述有功负荷; 无功负荷与日本的电气学会主张的一样, 使用100%恒阻抗模型。

美国西部电力系统协调协会(WECC), 修正了1996年、2000年电网故障仿真中的负荷模型, 感应电动机负荷要求占总负荷的20%~30%。

国际电气电子工程学会(IEEE)在1995年提

出了考虑负荷频率特性的静态负荷模型, 比较适合应用, 对于不同的负荷, 将模型中属性项做相应的处理, 可衍生出更加实用的模型。

美国WECC在2012年开始采用由电动机负荷模型、电力电子装置、等值配电网和静态负荷模型组成的综合负荷模型。

我国现在使用的负荷模型因不同电网区域的不同而有所差异。下表是我国不同区域电网在仿真计算中所使用的负荷模型。

表 我国不同区域电网所使用的负荷模型

电网名称	负荷模型
东北电网	50%恒阻抗+50%感应电动机负荷
华北电网	40%恒阻抗+60%感应电动机负荷
华中电网	河南、江西电网: 50%恒阻抗+50%感应电动机负荷
	湖北、湖南电网: 35%恒阻抗+65%感应电动机负荷
川渝	60%恒阻抗+40%电动机负荷
	广西、广东、贵州电网: 30%恒阻抗+40%恒电流+30%恒功率
云南电网	30%恒阻抗+30%恒电流+40%恒功率
	海南电网: 40%恒阻抗+30%恒电流+30%恒功率
南方电网	广州、香港电网: $L_{DP}=1.8$, $L_{DQ}=-2.0$
	广西、贵州、云南电网: $L_{DP}=1.2$, $L_{DQ}=-2.0$
海南电网	$L_{DP}=2$, $L_{DQ}=-2.0$

其中, 南方电网几乎仍在使用单纯的静态负荷模型来仿真计算, 而没有考虑到实际中大量的电动机负荷, 仿真计算的准确性需要进一步考究。

负荷建模方法

负荷建模方法大致可分为3类, 即统计综合法、总体测辨法和故障拟合法。

1. 统计综合法

统计综合法通过统计电力系统中负荷的组成、典型负荷特性, 依靠综合算法, 分析总结, 获得综合负荷模型。

统计综合法的优点是, 所建模型的参数具有明确的物理意义, 适用于任何系统、任何条件, 不需要现场试验和实测。其缺点是, 实时性不能保证, 新负荷接入电网、季节性负荷变化等, 导致要不断地对负荷模型进行更新, 并且负荷数据统计十分耗时耗力。另外, 现在用于数据统计的综合集算法还需要进一步完善, 使得模型不能很好地描述无功功率电压特性、动态特性和频率特性。

(下转第98页)

强度可高达3.5 MPa。因此,该绝缘隔板的力学性能满足要求,且具有一定的安全裕度。

型式试验验证

145 kV绝缘隔板在西安国家高压电器质量监督检验中心顺利通过了国家标准要求的水压爆破试验,爆破压力高达3.4 MPa,破坏形态如图8所示。145 kV绝缘隔板型式试验的顺利通过,进一

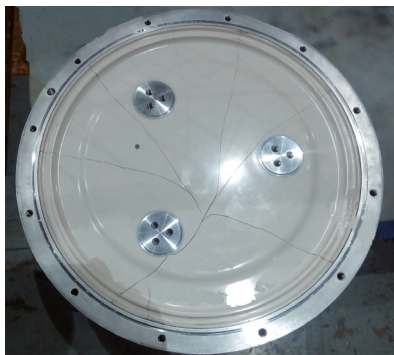


图8 145 kV绝缘隔板破坏形态

步验证了其力学性能的可靠性。

结束语

特变电工上开公司开发了具有自主知识产权的新型145 kV绝缘隔板。对其力学性能的相关研究表明。

1) 中心嵌件形状对绝缘隔板的机械强度有重要影响。经仿真计算,嵌件采用结构A的145 kV绝缘隔板可以耐受3.4 MPa水压试验压力,满足其力学性能要求。

2) 145 kV绝缘隔板顺利通过了型式试验及水压型式试验验证,进一步验证了其力学性能的可靠性。

特变电工新型145 kV绝缘隔板的研制成功,为其新型145 kV GIS的安全可靠运行提供了必要的技术保障。EA

(收稿日期:2017.04.12)

(编辑:刘群彦)

(上接第95页)

2. 总体测辨法

总体测辨法,利用等效理论,将接在枢纽变电站母线的配电网看成一个整体,只把这个负荷端口的电气特性进行等效,不用统计太多的负荷信息。

总体测辨法的优点是,负荷信息不用收集太多,方法简单,辨识结果真实。其缺点是,电力系统中的扰动数据不容易捕捉,并且在模型校验时,需要收集大量的实测数据。

3. 故障拟合法

故障拟合法,根据模拟的电力系统事故,修正已有负荷模型的结构和参数,使之尽量接近实际的电力系统事故。

故障拟合法的优点是,对参数调整后的负荷模型,对电力系统故障具有比较高的模拟精度。缺点是,根据故障拟合法所得的模型,适用性、应用范围和应用条件还需要机理分析和合理解释。

负荷建模的发展动态

20世纪70年代以来,美国电力研究院以统计

综合法来研究负荷建模,并研发了最具影响的软件包EPRLOADSYN。

20世纪80年代前后,出现了总体测辨负荷建模方法。该方法,根据系统辨识理论,依托计算机数据采集与处理技术,对现场测量,获得负荷特性样本,进而确定综合负荷模型。

我国负荷建模工作始于20世纪80年代,国家电网公司于2003年成立负荷建模工作组,2004年、2005年实地试验,获得了宝贵的大扰动实测数据。中国电力科学研究院根据国家电网公司的大扰动实测数据,提出了考虑配电网的综合负荷模型及其参数确定方法。国内若干院校科研团队也对负荷建模方法进行了深入研究,大大丰富了负荷建模理论,进一步推动了负荷建模的实用化。

随着分布式发电技术的进步和分布式电源的大量接入,负荷建模迎来了新的挑战,电力负荷建模的发展方向,将朝着“研究对象广泛化、研究手段综合化”的方向发展。EA

(收稿日期:2017.04.19)

(编辑:刘群彦)