

高压电力系统的建模及仿真分析

丁换换¹ 刘毅力¹ 田华明¹ 王建波² 武宗方¹

(1. 西安工程大学电子信息学院 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院 西安 710054)

摘要:在对某地区高压系统进行谐波分析时,由于高压电网的复杂性,使建模的复杂性和难度都大大增加。由此提出一种基于综合性电气分析计算软件 ETAP 建立简化模型的方案。首先在 ETAP 编辑界面按照地理位置搭建电力系统单线图,其次将实测数据录入模型并进行仿真分析。最后通过谐波分析,将仿真值与实测值的比较,允许两者误差在一定范围内,验证所采用发电厂、变电站等模型具有正确性、有效性。实际运行表明,该地区的模型简化方案切实可行。

关键词:高压电网; ETAP; 谐波分析; 95% 概率值

中图分类号: TN711.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Modeling and simulation analysis of high voltage power system

Ding Huanhuan¹ Liu Yili¹ Tian Huaming¹ Wang Jianbo² Wu Zongfang¹

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China)

Abstract: Due to the complexity of the high voltage power grid, the complexity and difficulty of the modeling are increased greatly when the harmonic analysis is carried out for a certain area of HV system. Therefore, a simplified model based on the integrated electrical analysis software ETAP is proposed. Firstly, the single line diagram of the power system is built according to the geographical position in the ETAP editing interface. Secondly, the measured data is input into the model and simulated. Finally, harmonic analysis is used to compare the simulation and measured values, allowing both errors to be within a certain range, and the correctness and effectiveness of the models such as power plants and substations are verified. Results shows that the model simplification scheme is feasible.

Keywords: HV power grid; harmonic analysis; ETAP; 95% probability value

0 引言

由于电网中电力电子设备的使用日益增加,非线性负载数量也相应增加,导致了电网中的电压和电流波形畸变愈发严重^[1]。在电力系统中,谐波增加系统的附加损耗,降低了发、输、配电设备的使用效率;影响各种电器设备,缩短使用寿命;在系统中使用的电容器可能会导致谐振,造成设备故障;谐波电流会导致保护装置动作特性改变,引起保护的误动或拒动,而且会引起电力测量仪表产生测量误差;对通信系统产生的干扰,严重时会使信息丢失。因此,谐波越来越受到电力用户及供电公司的关注,为了保证系统的安全运行^[2],就要对谐波进行评估与测量,确切掌握谐波的状况,对于防止谐波危害,维护电网的安全经济运行是十分必要的^[3]。作为谐波评估与测量

工作的基础与前提,电力系统的建模及分析还需要不断深入研究。

近年来,对于谐波的研究一直都是热点,在电力系统中,主要研究电网如何建模且仿真值是否更接近于实测值。文献[4-5]介绍了谐波评估的过程及重要性。传算法、统计学等方法为基础的谐波评估,这些评估算法模型较复杂,理论性较强,应用具有一定局限性,并指出在 ETAT 软件中无需知道模型内部结构。但在实际操作中,由内部结构及设备对电网造成的影响适当增加某项数据,可增加模型的准确度。在文献[6]针对电机提出了有关负荷的模型,但是在 MATLAB 中,所需数据较多,比较复杂,不具有普遍性。

针对高压电网系统的复杂性,提出合理的优化模型的方法,为简化复杂的实际工程提供理论参考。结合该地区

电网实际网架及工程实测数据,基于 ETAP 软件搭建数学模型并进行仿真,从理论上验证方案的可行性。

1 电力系统的谐波计算方法

谐波是指频率为基波频率整数倍的正弦波电流分量^[7]。谐波产生的原因是由于正弦电压加于非线性负载导致基波电流发生畸变^[8],即谐波主要来源于非线性负载:逆变器、整流器等。现在电网谐波分析主要分析奇次谐波,第 h 次谐波电压含有率:

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_h 为第 h 次谐波电压(方均根值), U_1 为基波电压(方均根值)。

谐波电压含量:

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} \quad (2)$$

电压总谐波畸变率 THD_u 是电压波形最通用的指标,定义:

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

由式(3)可推出:

$$THD_u = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (HRU_h)^2} \times 100\% \quad (4)$$

2 案例

2.1 背景

某地区将建设±800 kV 特高压直流输电工程,本工程配套电源主要为该地区电厂群,且以该地区 750 kV 及 330 kV 母线谐波情况为背景谐波。该地区的谐波主要来源于光伏发电厂,还有小部分谐波来源于非线性负载。根据各变电站及发电厂的地理位置,形成以 750 kV 1 变,330 kV 3 变、4 变、5 变、6 变、7 变等为主线的网架结构,如图 1 所示。

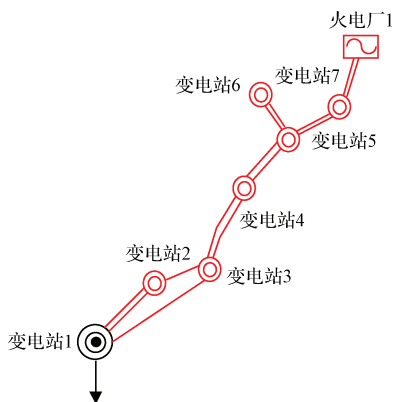


图 1 主要网架结构

2.2 ETAP 建模

ETAP 是功能全面的综合性电气分析计算软件,其友

好的用户界面、全面的数据集成、开放式的谐波库等特性都为谐波分析提供良好基础和全面功能^[9-10],在谐波分析方面可用于谐波状况评估、谐波治理设计、变电站运行方式改变对谐波的影响以及系统设备容量变化或数量增减对谐波的影响等几个方面的研究^[10]。除此之外,也可为发电、输配电和工业电力电气的规划、设计、分析、计算、运行、模拟提供全面的分析平台和解决方案。ETAP 软件还提供了电力系统仿真通用的元件,包括发电机、变压器、电力线路、等效负荷、继电器、开关器件等,建模时只需通过点击和拖放界面内的元件即可建立用户所需要的电力系统仿真模型,并利用元件的对话框设置相关参数^[11]。

2.2.1 发电厂建模

1) 火电厂

根据数据,查出各火电厂发电机、变压器台数及相关参数,如图 2 所示。

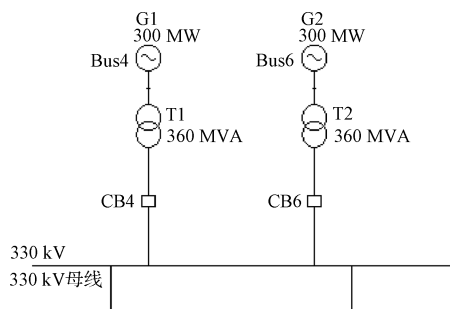


图 2 火电厂 1 模型

图 2 中有两台 300 MW 发电机,两台 360 MVA 变压器,在线路上各加一个高压断路器。将发电机出力电压升到 330 kV,另外此火电厂对外有两条 330 kV 输电线路。将这些发电机、变压器及母线都封装到一个复合网络(Network)里。

2) 光伏发电厂

ETAP 不能模拟其动态时状态,在光伏发电厂建模时,将其等效为一个等效电源。

在等效电网中,要特别注意其控制模式。在一个电力系统中,设置一个平衡节点,在此工程中,平衡节点设置在容量较大的等值点处。而在光伏发电厂,将控制模式设置为无功控制。将光伏发电厂模拟一个出力恒定的电源或容量恒定的负荷。

2.2.2 变电站建模

变电站的建模要比发电厂的建模复杂。在高压电力系统网络里,火电厂中的由发电机、变压器产生的谐波及其损耗都忽略不计。但是在变电站的建模中,会出现两种不同的建模方式。在此特高压系统里,变电站的建模取决于其有几种输电线路等级。以 1 变为例,如图 3 所示。

图 3 变电站建模的模型 1 中,与此变电站相连的输电

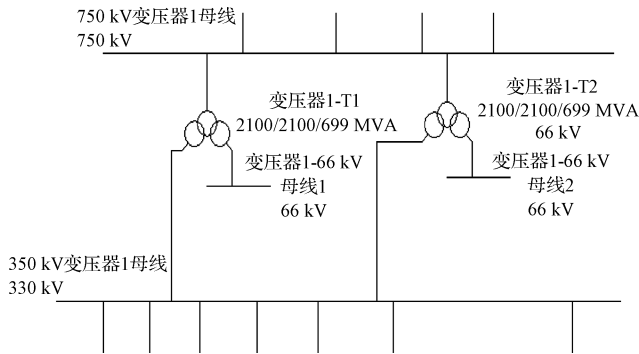


图3 变电站1站内模型

线路电压等级为750 kV及330 kV,那么在此变电站中的三相变压器不能忽视。在理论上,将整个变电站完整地搭建起来。模型2是与变电站相连的输电线路电压等级只有330 kV。

整个变电站的负载、损耗以及自身的谐波都可添加在站内的负荷里。负荷模型无需过多数据,在ETAP软件中,使用静态负荷,如图4所示。



图4 变电站2负荷模型数据框

3 仿真及数据实测结果对比分析

建模后,在软件ETAP的“潮流分析”模块中先进行潮流分析。将仿真结果与实际工况相对比,适当调试参数使仿真结果与实测值在允许误差范围内。

校正之后,利用软件ETAP提供的自定义谐波源的功能,采用实测数据CP95值建立新谐波库。本文案例的电力系统比较复杂,并且实测数据是由电容式电压互感器CVT测量计算,此特点为电压测量不够精确,所以在建立谐波库时,输入实测谐波电流值建立谐波电流源。为了实际应用方面,实测值的95%概率值近似选取方法:将实测值按降序排列,舍弃前面5%的大值,取剩余实测值中的最大值^[12]。在各测试点注入谐波源信号之后,运用“谐波潮流”计算,显示现有系统各条线路、各母线的各次谐波存在状况^[13],将得到的各变电站母线电压以及各条线路电流谐波仿真值与实测值进行对比,验证模型的准确性、合理性、有效性。

主要变电站内负荷模型已录入实测谐波数据,限于篇幅,只列出部分母线及线路谐波电流仿真计算结果与实测结果的比较情况。部分母线、线路谐波电流仿真值与实测值的对比结果如表1、2所示。其计算方法如式(1)~(4)所示。

表1 部分变电站母线谐波电压仿真值与实测值对比结果 (%)

| 谐波次数 | 变1~330 kV | | 变5~330 kV | | 变4~330 kV | |
|---------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| | 实测值 | 仿真值 | 实测值 | 仿真值 | 实测值 | 仿真值 |
| THD_u | 0.76 | 1.04 | 1.18 | 1.40 | 1.03 | 1.12 |
| 2 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| 3 | 0.53 | 0.49 | 0.23 | 0.36 | 0.35 | 0.32 |
| 4 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.04 | 0.04 |
| 5 | 0.36 | 0.38 | 0.52 | 0.45 | 0.36 | 0.32 |
| 6 | 0.08 | 0.05 | 0.09 | 0.04 | 0.07 | 0.03 |
| 7 | 0.50 | 0.57 | 1.12 | 1.26 | 0.97 | 0.96 |
| 8 | 0.08 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.17 | 0.10 |
| 9 | 0.09 | 0.11 | 0.05 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| 10 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.07 |
| 11 | 0.06 | 0.11 | 0.07 | 0.09 | 0.06 | 0.08 |
| 12 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| 13 | 0.11 | 0.18 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.20 |

表2 部分变电站母线谐波电压仿真值与实测值对比结果 (A)

| 谐波次数 | 750 kV 变1-等效电源 I 线 | | 330 kV 变4-变5 线路 | | 330 kV 变5-变6 线路 | |
|------|--------------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | 实测值 | 仿真值 | 实测值 | 仿真值 | 实测值 | 仿真值 |
| 3 | 4.16 | 4.25 | 3.30 | 3.28 | 1.60 | 1.48 |
| 5 | 2.00 | 2.85 | 1.80 | 1.77 | 1.60 | 1.67 |
| 7 | 4.04 | 4.07 | 1.20 | 0.96 | 0.70 | 0.68 |
| 9 | 0.69 | 0.54 | 0.60 | 0.57 | 0.40 | 0.43 |
| 11 | 7.14 | 7.00 | 0.90 | 0.89 | 0.70 | 0.68 |
| 13 | 3.24 | 3.40 | 1.50 | 1.29 | 0.80 | 0.83 |
| 15 | 0.44 | 0.39 | 0.80 | 0.77 | 0.60 | 0.57 |

由于实测谐波电流的95%概率值与实测谐波电压的95%概率值之间存在偏差^[14],故允许两者有一定的误差。

从表1部分母线仿真计算结果看出,各变电站母线的谐波电压总畸变率与实际测试值基本一致,各次谐波含有率与实测各次谐波含有率也较为接近,由此说明仿真模型能够较为真实地反映真实系统的谐波情况。

表2所示为部分线路的谐波电流仿真值与实测值的比较,其主要以3、5、7、9、11、13次等奇次谐波为主,仿真值与实测值基本一致,从而验证了建立的此地区电网模型的正确性。

4 结论

在面临大规模复杂的系统时,综合性电气分析计算软

件 ETAP 表现出其优越性,解决了理论计算对于复杂的电力系统计算不精确的问题。本文是基于软件 ETAP 对某地区建立电网优化仿真建模并进行验证。通过谐波分析的仿真数据与实测数据的对比,验证了对于高压、复杂的电力系统网络采取的优化模型的方案是合理有效的,并且表现了在谐波仿真方面 ETAP 软件的卓越性,能够有效地为规划大规模系统、评估复杂的实际工程的电能质量提供理论参考。但在本文中对于高压电抗器及变压器产生的主要谐波数据为估计值,由于数据较小,对整个电网的影响并不大。在此理论的基础上,考虑到各类谐波源负荷的增长情况,将负荷按照年增长率计算后的结果录入到预估仿真模型中,可对谐波状况评估,预测未来某年的谐波含量。

参考文献

- [1] 黄彬,孙培德.无谐波检测电力电子滤波器的仿真与特性分析[J].电子测量技术,2015,38(2):1-5.
- [2] 戴文,魏淑艳,曹明革.小波变换在谐波检测中的应用研究[J].电子测量技术,2011,34(7):37-39.
- [3] 张鸿博,蔡晓峰,鲁改凤,等.基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析[J].仪器仪表学报,2015,36(12):2835-2841.
- [4] 李晓军,于腾凯.基于 ETAP 软件的矿热炉负荷谐波影响评估与治理[J].电网与清洁能源,2013,29(1):45-49.
- [5] 张一帆,邓昆玲,尹柏清.应用 ETAP 软件分析电气化铁路对电网的影响[J].内蒙古电力技术,2010,28(52):20-22.
- [6] ZUPAN A, TOMASOVIC A T, FILIPOVIC B G. Modeling of 25 kV electric railway system for power quality studies[J]. Eurocon,2013:844-849.
- [7] 魏学良,程婷.谐波治理设备在供电系统中的应用[J].国外电子测量技术,2015,34(1):80-83.
- [8] PANG J, GAO L. Study of the electrical power network harmonic analysis algorithm technology based on gradient blind signal separation[J]. Sensors & Transducers, 2013,157(10):212-216
- [9] 林涛,王思源,郑杰.基于 ETAP 的电力系统电能质量问题研究与分析[J].电力科学与技术学报,2010,25(1):27-34.
- [10] 郑杰,林涛,毕玥,等.基于电力系统分析软件 ETAP 的电网谐波分析[J].电网与清洁能源,2011,27(7):7-12.
- [11] 朱慧.基于 ETAP 软件的电力系统潮流仿真分析[J].青岛大学学报:工程技术版,2015,30(1):63-67.
- [12] 孙巍巍,曾江,俞家良,等.谐波国标中 95% 概率值评价方式的探讨[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):7-11.
- [13] 翁元禄,龚陈雄,林焱.基于 ETAP 软件的无源滤波器的设计[J].电力与电工,2011,31(4):31-33.
- [14] 常帅,郭昆丽,王建波,等.电气化铁路谐波对地区电网的影响西[J].西安工程大学学报,2016,30(3):327-332.

作者简介

丁换换,1990 年出生,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制。
E-mail:895408920@qq.com