

ETAP 软件在短路实验教学中的应用

摘要：针对电力工程基础课程在传统教学过程中强调计算而忽视电力系统分析、设计的情况，提出引入 ETAP 软件进行实践教学的新方法。以三相短路为例进行了理论分析，并以某辐射型电网为模型，应用 ETAP 进行了多种短路仿真实验，对实验方法做了详细说明，对实验结果进行了分析。课程设置的仿真实验包括三相短路计算、断路器的选择、不对称短路故障分析、相关参数对短路电流的影响等。通过这些实验，可以加深学生对电力系统短路知识的理解，从而更好的提高教学质量。

关键词：电力系统；仿真实验；ETAP；短路

【中图分类号】TM7-4；G642

电力系统相关课程包括电力工程基础、电力系统分析和电力系统自动化等。由于电力系统规模大、系统结构和运行方式复杂，许多大型电力系统实验很难进行，特别是电力系统中对设备和人员危害较大的短路故障实验，因此电力系统仿真教学成为电力系统教学中的一种重要方法。

在三相系统中，可能发生的短路包括三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路，其中三相短路对系统造成的危害最为严重，并且三相短路计算是其他不对称短路计算的基础，本文首先介绍了三相短路电流的计算方法，并以此为理论基础开展相关实验。

1 电力系统仿真软件简介



电力系统仿真软件包括 Matlab、Power

World

Simulator、PSCAD/EMTDC、BPA、PSASP 等，它们的结构和功能特点不同，各自的应用领域也有所侧重，如 PSCAD/EMTDC 主要进行电磁暂态和控制环节的仿真，BPA、PSASP 主要进行潮流和机电暂态数字仿真，Matlab、Power World SimulatorTM 用于一般教学[1]。ETAP 软件是用于发电、配电和电力系统设计的专业商用软件，由于价格较高，目前尚未广泛应用于教学科研。南京航空航天大学自动化学院通过与 ETAP 公司合作，获得该软件的教学使用权，借此机遇将 ETAP 软件引入电力系统仿真教学中有重要意义，它不仅可以满足基本教学要求，还可以激发学生的研究兴趣，培养学生的创新意识和提高其解决工程问题的能力。

2 三相短路电流的理论分析

对于网状电网的三相短路，根据 IEC 标准，短路点用一个等效电压源取代，其他所有设备都被表示成它们的内阻抗 Z_k ，三相短路电流初始值（次暂态电流）的计算使用以下公式：

式中， U_n 是短路点的系统标称电压，电压修正系数 c 根据系统电压等级的不同取值不同， Z_k 是短路点的等效阻抗，并且有。

短路电流峰值 i_p 的计算使用如下公式：

其中峰值系数 k 与 R/X 比值相关。为前面提到的短路电流初始值 [2-3]。

3 基于 ETAP 的短路仿真实验

3.1 电力系统模型

电力系统模型选用如图 1 所示的辐射型系统，等效电网 U_1 额定电压



为 110kV，短路额定容量 2500MVA；同步发电机 Gen1 控制方式为无功控制，额定有功功率=25MW，额定电压=10.5kV，功率因素=80%；电动机 Mtr1 额定功率=2000kW，额定电压 10kV；变压器 T1、T2 的变比=110/10.5，其他参数设为其典型值；电缆 Cable1 型号为 BS6622XLPE、长度=200m，截面积=50mm²。Lump1、Lump2 和 Lump3 的额定容量分别为 18MVA、4MVA、26MVA，负荷类型为恒容量 100%，其他参数见图 1 中注释。

3.2 短路仿真实验及分析

本课程设置的仿真实验主要包括三相短路计算、断路器的选择、不对称短路故障分析、相关参数对短路电流的影响。

3.2.1 三相短路计算

该实验可以使学生掌握三相短路计算中发电机的参数设置，并验证三相短路相关理论。运行短路计算，需要设置发电机 Gen1 的直轴次暂态电抗 X_d'' 、直轴电抗 X_d 以及 X/R 比率，本实验中通过点击“典型数据”赋值于这几个参数。设定故障位置为 Bus4，运行三相短路计算，仿真结果显示 Bus4 的电压为 0，故障电流峰值为 107.6kA，初始对称有效值为 41kA。而系统无故障运行时 Bus4 的电压为 10.69kV，电流为 1.6kA，实验结果表明发生三相短路时，短路点电压降为零，短路电流急剧增加。并且注意到等效电网额定电压为 110kV，变压器 T2 变比为 110/10.5，一般情况下由于变压器自身阻抗的损耗，变压器低压侧电压应小于 10.5，而系统无故障运行时 Bus4 的电压值 10.69 大于 10.5，分析原因可知由于 Bus4 连接了发电机，且发电机的控制方式为无功控制，发电机发电的总



功率大于负载 Lump3 消耗的总功率，导致多余的功率通过变压器 T2 返回到等效电网，因此 Bus4 的电压值大于 10.5。反之，如果要将 Bus4 的电压调为 10.5，最简单的方法是将发电机的控制方式改为电压控制，也可以通过调整发电机或负载的功率来实现。

3.2.2 断路器的选择

短路电流的计算是电力系统设计和运行的基础，可用于选择电气设备和载流导体，选择和整定继电保护装置，确定合理的主接线方案、运行方式及限流措施等。该实验通过断路器的选择，使学生对三相短路电流计算的用途有所了解。断路器首先应根据额定电压和额定电流来选择，断路器的额定电压不应小于所在回路的最高运行电压，额定电流不应小于该回路在各种可能运行方式下的持续工作电流；此外要保证短路情况下断路器的稳定性，即断路器的额定动稳定电流和额定开断电流应大于相应的三相短路计算值。

例如在本实验中打开断路器 CB5 编辑器，选择库中型号为 Siemens 12-3AF-31.5 的断路器，其额定电压为 12kV，额定电流为 2.5kA，设定故障位置为 Bus4，运行三相短路计算后出现断路器报警窗口。报警窗口显示断路器 CB5 的动稳定峰值电流和开断电流分别超负荷运行 134.5%和 132.7%。重新选择型号为 Siemens 12-3AF-63 的断路器，其额定动稳定电流为 160kA，开断电流为 63kA，再次执行三相短路分析，运行后报警消失。

3.2.3 不对称短路故障分析

设置 Bus4 为故障母线，运行不对称短路计算，Bus4 不对称短路电流计算结果如图 2 所示。结果显示三相短路冲击电流峰值及其有效值均大



于相应的不对称短路电流，由此可见三相短路对系统造成的危害更为严重。观察报告中短路点的电压、电流，验证不对称短路的边界条件，下面以单相接地短路为例进行分析。实验结果显示单相接地短路后 A 相对地电压为 0，说明 A 相接地；B、C 两非故障相电压幅值变为原电压的 173% 倍，验证了如下结论，即中性点不接地的电力系统单相接地短路后，非故障相对地电压升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍，即变成线电压；单相接地短路后三相电压不再平衡，说明单相接地短路为不对称短路。

3.2.4 相关参数对短路电流的影响

将电缆 Cable1 的长度分别设为 100m、200m、400m，设其末端母线 Bus3 为短路点，运行三相短路计算，短路冲击电流有效值分别显示为 29kA、25.4kA、20.6kA，实验表明短路点距离电网电源越远，三相短路电流越小。因为距离电网电源越远，短路点处的等效电抗越大，等效电源电压恒定的情况下，短路电流就越小。

在短路计算中把电动机负荷（或叫旋转负荷）和照明加热负荷（或叫静止负荷）分开考虑，它们分别对应 ETAP 等效负荷里的 100%恒容量模型和 100%恒阻抗模型。通过以下实验可以探索不同的负荷模型对短路电流的影响。将 Lump2 的负荷类型分别设为 100%恒容量、50%恒容量（50%恒阻抗）和 100%恒阻抗，运行三相短路电流计算。运行结果如图 3 所示，Lump2 在三种不同模式下对短路母线的贡献电流分别为 1.65kA、0.826kA、0kA，电动机 Mtr1 的贡献电流均为 0.946kA。实验结果显示电动机负荷有短路电流反馈，而照明加热负荷（100%恒阻抗）没有，并且随着等效负荷恒容量百分数的增大，反馈电流增加。



4 结语

在短路仿真实验中，ETAP 显示出其直观方便准确的特点，学生可以投入更多的精力用于电力系统的设计和分析。论文给出了短路故障的具体仿真实验方法，以期在电力系统相关课程中实现理论教学和实践教学环节的相互协调，互相补充，从而更好的提高教学质量，提高学生解决复杂问题的能力，培养学生的创新意识。

参考文献：

- [1]李广凯，李庚银. 电力系统仿真软件综述[J]. 电气电子教学学报，2005，27（3）：61-65.
- [2]??慧华，黄辉，戈晴天. ETAP 的三相短路电流计算与传统实用计算比较分析[J]. 硅谷，2011：188-189.

