

基于 ETAP 软件的电力系统暂态稳定性仿真研究

高 博, 赵 毅, 王一鸣, 吴志宏

(沈阳工程学院 电力学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 在分析电力系统暂态稳定基本原理的基础上, 介绍了 ETAP 软件的特点及其在暂态稳定仿真时的优越性, 通过构建典型电力系统模型并分别开展不同故障类型的仿真实验, 得出了包括发电机转速、电磁功率、相对功角、母线电压和转差在内的仿真曲线, 对比分析了仿真曲线的形成机理并进行了总结。

关键词: 暂态稳定; ETAP; 仿真分析

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1673-1603(2015)04-0048-07

随着现代社会经济的飞速发展, 电力系统也随之不断地进行发展和扩大, 各种用电设备的出现也使得电力系统变得更加复杂。当电力系统受到大的扰动时(如切除大容量用户、发生短路故障等), 表现为系统运行状态的各种电磁参数发生急剧的变化。从暂态稳定分析可知, 发电机轴上出现的不平衡转矩将使发电机产生剧烈的相对运动, 发电机的相对角剧烈振荡。所谓暂态稳定是指电力系统在某个运行情况下突然受到大的干扰后, 能否经过暂态过程达到新的稳态运行状态或者恢复到原来的状态。如果系统受到大干扰后仍能稳态运行, 则系统在这种运行情况下是暂态稳定的; 反之, 若回不到稳定运行状态, 各发电机组转子间一直有相对运动, 相对角不断变化, 致使整个系统不能继续运行下去, 则系统不能保持暂态稳定, 将对电力系统造成非常不利的影响。

针对上述问题, 利用 ETAP 分析系统变化或受干扰时和变化前后电力系统的稳定极限。程序模

拟电力系统的动态特性, 执行用户设定的事件和动作, 解系统网络方程和机械微分方程, 发现系统和发电机在时域内的响应。通过这些响应, 可以确定暂态特性, 进一步加强措施来提高系统的稳定性。

1 ETAP 软件暂态分析功能模块简介

ETAP(Electrical Transient Analysis Program)是由美国 OTI 公司(Operation Technology Inc)开发的。ETAP 在美国确立了电力系统设计和分析软件的标准, 也是全美第一个特许提供给核电站进行电力系统分析的商用软件。

在总体设计上, ETAP 采用三维数据库的模式, 将每个系统元件的电气、机械、逻辑以及物理属性整合到一个工程电气数据库中, 再与图形显示和系统连线方式以正交方式组织起来, 为 ETAP 实行数据管理和分析计算提供更大的方便。在仿真分析方面, 该软件集成了潮流分析、短路计算、暂态稳

收稿日期: 2015-04-16

基金项目: 辽宁省教育厅项目(12014531)

作者简介: 高 博(1993-), 男, 辽宁盘锦人, 工程师。

定分析、谐波分析、发电机/电动机起动分析、可靠性分析、继电保护配合、优化潮流、直流潮流、智能切负荷等模块。ETAP 提供了简便快捷的电力系统模型搭建方式,所有的电力系统参数输入和连接图操作都可以直接在图形界面上完成,显示结果一目了然。对于各种电力系统元素在暂态下的模型参数,ETAP 均有集成,如感应及同步电动机/发电机动态模型、电机频率响应模型、系统频率响应模型、IEEE 和制造商的励磁器和调速器模型、电机负荷模型等。ETAP 可以精确分析各种暂态,比如用电压和频率继电器自动甩负荷,电机驱动,阀门起

动,电机加速,临界故障切除时间,快速母线切换研究,冲击负荷和发电机切除分析等。

2 基于 ETAP 的暂态稳定仿真分析

2.1 仿真模型的构建

所构建模型是一个包括 1 台容量为 25 MW 的发电机,7 个节点,6 个不同额定容量的等效负荷及 1 个额定容量为 8 MVA 静态负荷的典型电力系统,电压等级为 110/10 kV,如图 1 所示。

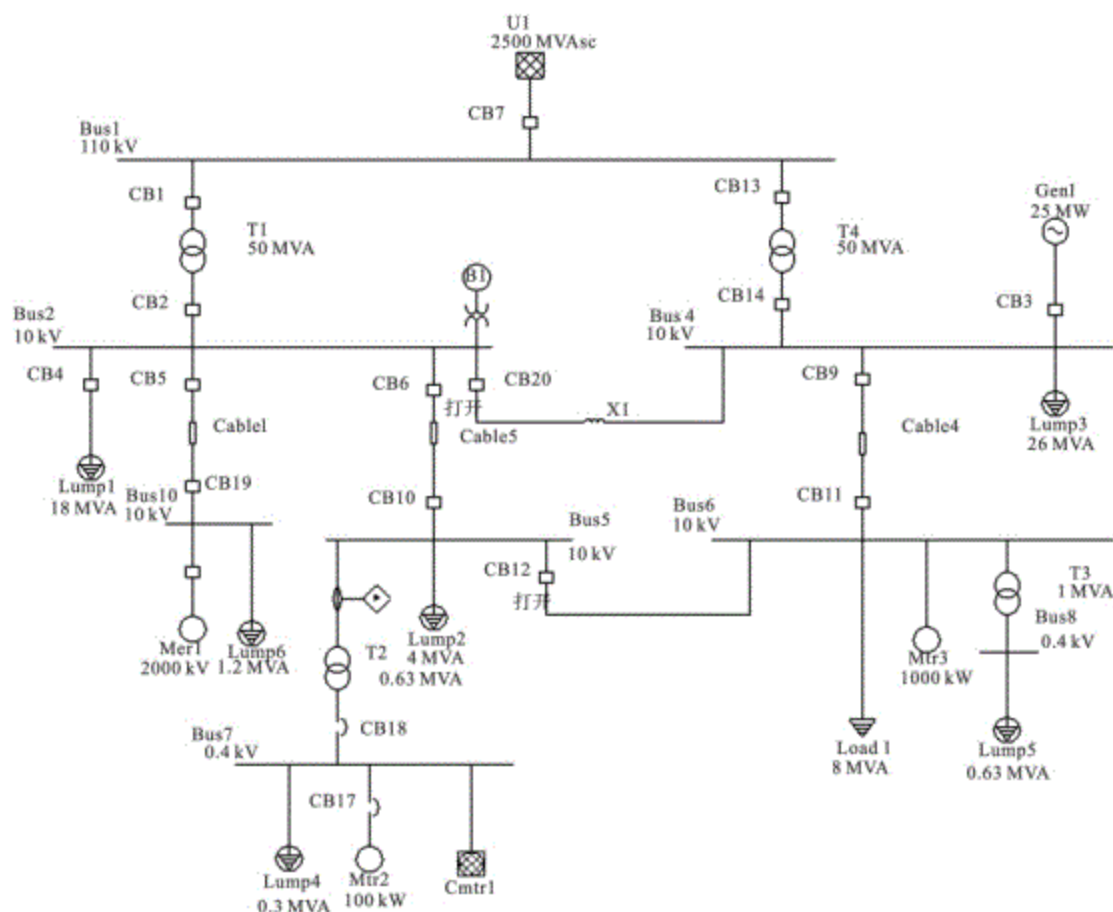


图1 典型电力系统

2.2 仿真模型设备参数

1) 等效电网。额定电压 110 kV,三相短路容量 2 500 MVA,单相短路容量 2 000 MVA,系统的

抗阻比为 30。

2) 变压器。

表1 变压器参数

变压器名称	额定电压/kV	额定容量/MVA	接地	%Z	X/R
T1	110/10.5	50	Y_0/Δ	10.5	取典型值
T2	10/0.4	0.63	Δ/Y_0	取典型值	取典型值
T3	10/0.4	1	Δ/Y_0	取典型值	取典型值
T4	110/10.5	50	Y_0/Δ	10.5	取典型值

3) 等效负荷。

表2 等效负荷参数

等效负荷名称	额定容量/MVA	%PF	负荷类型	
			Design	Normal
Lump1	18	95	100%	90%
Lump2	4	90	100%	100%
Lump3	26	95	100%	100%
Lump4	0.3	90	100%	100%
Lump5	0.6	90	100%	100%
Lump6	1.2	90	100%	100%

4) 静态负荷。额定容量 8 MVA, 功率因数(%PF) = 85%, ETAP 自动生成 6.8 MW、4.214 MVar、461.9 A 等数据, 负荷类型 Design 为 100%、负荷类型 Normal 为 80%。

5) 电动机。

表3 电动机参数

等效负荷名称	额定容量/MVA	额定电压/kV	负荷类型	
			Design	Normal
Mtr1	2000	10	100%	90%
Mtr2	100	0.38	100%	90%
Mtr3	1000	10	100%	90%
Mtr4	50	0.38	100%	90%
Mtr5	75	0.38	100%	90%
Mtr6	25	0.38	100%	90%

6) 发电机。控制方式为无功控制, 额定有功功率 25 MW, 额定电压 10.5 kV, 功率因数 80%, 发电类型为 Design 时, 有功功率为 25 MW, 无功功率为 15.5 Mvar, $Q_{\max} = 18.75$ Mvar, $Q_{\min} = -8$ Mvar, 发电类型为 Normal 时, 有功功率 20 MW, 无功功率 12.4 Mvar, $Q_{\max} = 15$ Mvar, $Q_{\min} = -6.5$ Mvar。

7) 电缆。

表4 电缆参数

电缆名称	电缆型号	截面积/mm ²	长度/m
Cable1	BS6622 XLPE	50	200
Cable2	BS6622 EPR	400	30
Cable3	BS6622 EPR	400	500
Cable4	BS6622 EPR	400	500

8) 电抗器。额定电压 = 10 kV, 额定电流 = 3 000 A, $U_R(\%) = 10$, $X/R = 34$ (取典型值)。输入阻抗有名值: 正序阻抗为 0.192 4 Ω , 零序阻抗为 0.192 4 Ω 。

3 仿真分析

电力系统发生单相接地短路时短路电流计算公式为:

$$I_a = \frac{3U_{f01}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \quad (1)$$

发生三相短路故障时短路电流计算公式为:

$$I_a = \frac{U_{f01}}{X_{1\Sigma}} \quad (2)$$

式中, U_{f01} 为短路发生前故障点电压, $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ 分别为发电机到故障点的正序电抗, 负序电抗和零序电抗。

假设在图 1 所示系统中, 母线 1 在 $t = 0.7$ s 时分别发生三相短路和单相短路, 从发电机转速、电磁功率、相对功角、母线电压和转差等方面, 详细分析暂态过程, 绘制仿真曲线, 并对不同故障仿真结

果的差异性进行解析。

1) 发电机 Gen1 的转速曲线

0~0.5 s 时,系统正常运行,发电机 Gen1 的转速保持不变,从图 2 上表现为一段平行于时间轴的线段;0.5~0.7 s 时,母线 1 发生三相短路故障,发电机的电磁功率将减小,使得功率小于原动机的机械功率,此时原动机的机械功率还来不及改变,为了达到功率平衡,发电机将通过增加转速来提高电磁功率,从图上表现为发电机的转速突然急剧增加;0.7 s 以后故障切除,系统恢复正常,发电机的电磁功率逐渐增加,经过一段时间的阻尼振荡后,再一次恢复平衡,从图上表现为发电机的转速一直在变化且变化幅度逐渐减小,经过一段时间后维持在原来的状态下保持不变。原动机、联轴器、发电机的惯量影响着发电机转速曲线恢复平衡时振荡的幅值。惯量增加,发电机转速振荡幅值越小;惯量减小,发电机转速振荡幅值越长。在振荡过程中,转子和气隙合成磁场发生相对运动,引起转子阻尼绕组中产生感应电动势,并引起相应的电气损耗,同时转子转速的变化又将引起机械损耗的增加,故振荡的振幅是衰减的。经过几个振荡周期之后,功率达到平衡点后稳定运行。在特殊情况下,振荡的第一个周期振幅过大,会使发电机失去稳定。图 3 为发电机发生单相接地故障时发电机的转速曲线,对比图 2 的转速曲线,根据式(1)和式(2)中短路电流的计算公式可知,发生单相接地故障时故障电流比三相故障时小很多,故发生单相接地短路对系统运行的影响比三相短路小,所以在发电机侧表现为转速变化的幅度比单相接地短路变化小。

2) 发电机 Gen1 的电磁功率曲线

0~0.5 s 时,系统正常运行,发电机的输出电磁功率保持不变,从图 4 表现为输出的电磁功率为一段平行于时间轴的线段;0.5~0.7 s 时,母线 1 发生三相短路故障,发电机所带负载瞬间减小,输出的电磁功率也随之减小,从图上表现为输出电磁

功率急剧下降;0.7 s 之后,由于故障的切除,发电机所带负载增加,转子通过加速运行来增加电磁功

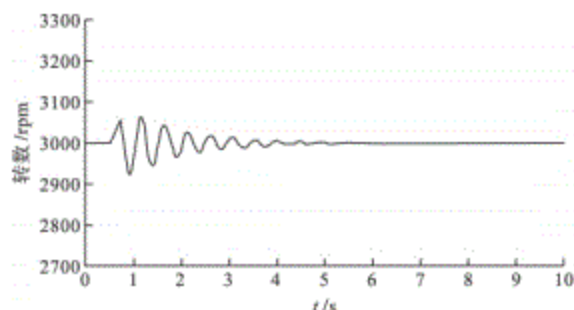


图2 三相短路时发电机转速曲线

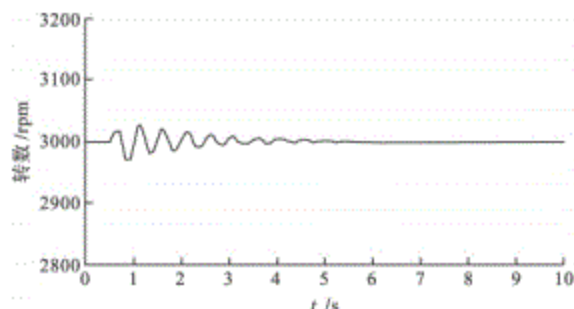


图3 单相短路时发电机转速曲线

率的输出,经过几个周期的阻尼振荡,最终恢复到稳定状态。根据等面积定理可以解释为 0~0.5 s 时,系统正常运行,发电机的输出电磁功率保持不变;0.5~0.7 s 时,由于母线 1 的三相短路故障,使得发电机发出的电磁功率减少;0.7 s 之后,故障切除,此时原动机的机械功率大于发电机的电磁功率,使得发电机加速运行,由于惯性作用当发电机的电磁功率等于原动机的机械功率时,发电机还会继续加速运行,此时电磁功率大于原动机的机械功率,使转子受到制动,转子速度逐渐减慢,当降到与原动机的机械功率相同时,惯性的作用使得转子继续运动,就这样经过几次振荡后,发电机输出的电磁功率与原动机的机械功率保持一致,最终发电机恢复到稳定状态运行。发电机在振荡过程中,发电机的电磁功率也相应的振荡,从而影响电网的正常

运行。为了使振荡尽快趋于稳定,通常在转子表面装设阻尼绕组,该绕组中因振荡而感应产生的电流损耗将吸收转子积聚的能量,使振幅衰减并逐渐消失,最终使发电机趋于稳定。通过与图5发电机发生单相短路时的电磁功率曲线相比,可以直观地看出,对于发电机振荡的电磁功率峰值,单相短路远小于三相短路。

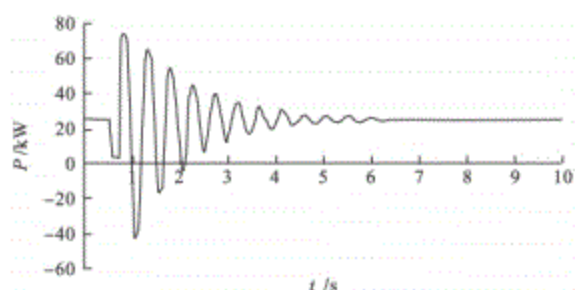


图4 三相短路时发电机电磁功率曲线

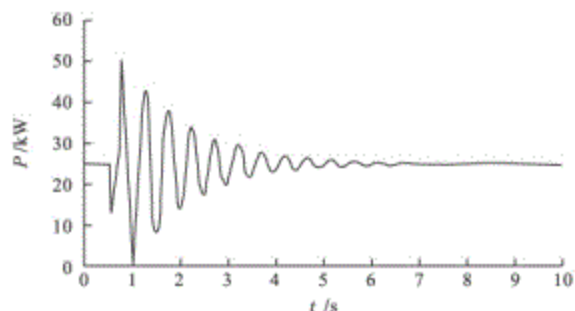


图5 单相短路时发电机电磁功率曲线

3) 发电机 Gen1 的功角曲线

E_0 和 U 这两个时间相量之间的时间相位差角即是功角。同步发电机通过电磁感应的作用,将转轴上输入的机械功率 P_m 转换成电功率 P_2 ,从定子侧输出。由隐极同步发电机的功角特性 $P_m \approx P_2 = \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta$ 可知(对于大、中性容量的同步发电机定子绕组铜损耗 P_{cu} 不超过额定功率的1%,可忽略不计,故 $P_m \approx P_2$), 0~0.5 s 时,系统正常运行,功角维持一个定值不变,从图上表现为一段平行于时间轴的线段;0.5~0.7 s 时,母线1发生三相短

路故障,其中 P_2, E_0, X_d 基本不变,母线电压下降到一个很小的数值,为达到平衡, $\sin \delta$ 增大,故 δ 随之增大,从图6表现为功角的度数急剧增加;0.7 s 之后,由于故障切除,母线电压 U 逐渐恢复到故障前状态,所以 $\sin \delta$ 逐渐减小, δ 随之减小。经过几个周期的阻尼振荡后再一次恢复到稳定的状态,从图上表现为功角随时间一直在不断变化,最终趋于稳定的值不变。发电机在振荡过程中,功角也随之振荡,发电机的电磁功率也相应的振荡,从而影响电网的运行。为了使振荡能尽快趋于稳定,通常在转子表面装设阻尼绕组,该绕组中因振荡而感应产生的电流损耗将吸收转子积聚的能量,使振幅衰减并逐渐消失,发电机最终趋于稳定。对比图8,可以看出发生单相短路时的相对功角比发生三相故障时的相对功角小很多,这是因为三相短路故障对电力系统的影响比单相短路严重得多的缘故。

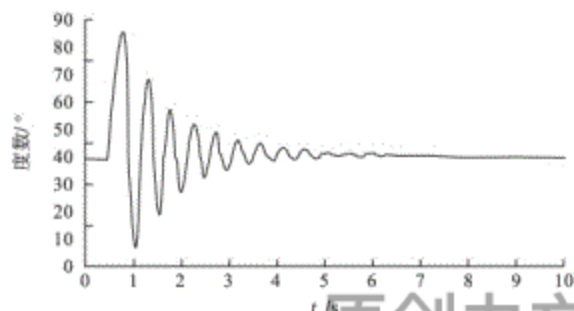


图6 三相短路时发电机的相对功角

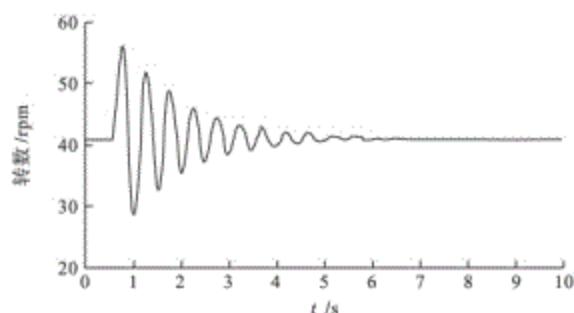


图7 单相短路时发电机的相对功角

4) 电动机 Mtr1 连接母线电压

0~0.5 s 时,系统正常运行,电动机 Mtr1 连接的母线电压保持不变,从图上表现为一段平行于时间轴的线段;0.5~0.7 s 时,母线 1 发生三相短路故障,改变了系统的潮流分布,使得大量潮流涌向故障母线 1,电动机 Mtr1 连接的母线失压,母线电压急剧下降,从图上表现为电压急剧下降到接近于零的位置;0.7 s 之后,故障切除,潮流逐渐恢复到稳定时的状态分布,电动机 Mtr1 连接的母线电压经过几个周期的振荡恢复到故障前状态,表现为电压急剧增大,最终恢复到接近稳定的状态。电动机 Mtr1 连接的母线 10 的残压可以根据短路电流求出,结果必然比三相短路时母线的残压大很多。这说明发生三相短路时对系统的影响很大。

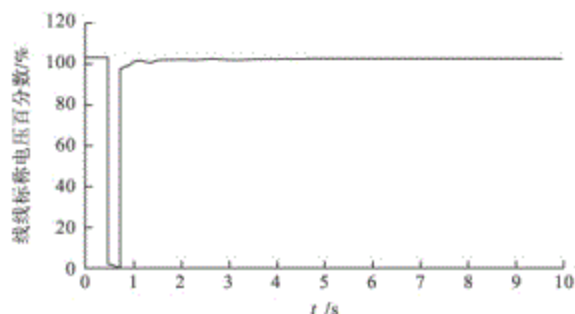


图8 三相短路时母线电压

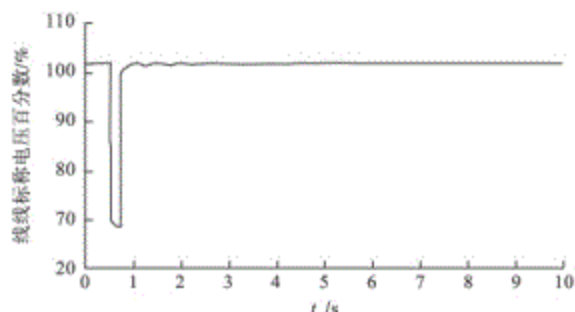


图9 单相短路时母线电压

5) 电动机转差曲线

同步转速与转子的转速之差称为转差。0~0.5 s 时,系统运行正常,电机 Mtr1 的同步转速与

转子的转速之差维持不变,从图上表现为一段平行于时间轴的线段;0.5~0.7 s 时,母线 1 发生三相短路故障,同步转速与转子的转速之差的绝对值迅速增加,从图上表现为转差急剧增大;0.7 s 之后,故障切除,同步转速与转子的转速之差的绝对值急剧下降,由于惯性的作用,在经过几个周期的阻尼振荡后,转差恢复到稳定的状态,并保持不变。由于发生单相短路故障,同步速度和转子的转速之差相差不是太大,故表现在比三相短路时的转差小。

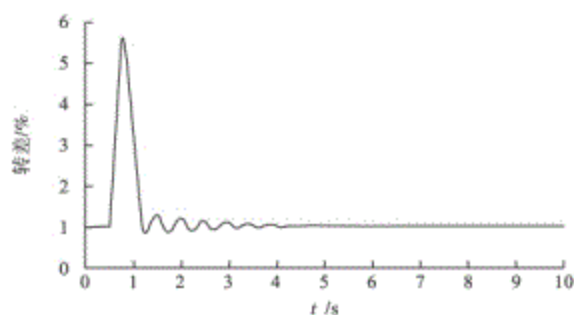


图10 三相短路时电动机转差

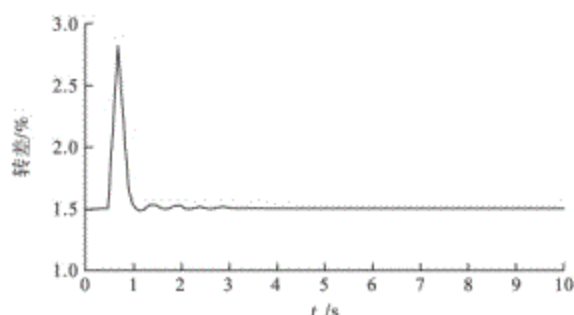


图11 单相短路时电动机转差

4 结 论

通过 ETAP 软件分析了一个简单的系统在大扰动情况下的稳定性,得出了暂态稳定下的一些时域曲线。分析仿真结果后,得出如下结论:

1) 当系统发生故障时,发电机的转速都会发生变化。发生三相短路故障时发电机转速变化幅度较大;发生单相短路故障时发电机转速变化幅度