

化工企业备用电源快切装置的 仿真与应用探讨

采用ETAP电气仿真软件，进行了化工企业的备用电源快切装置在不同故障类型、不同的负载特性时的仿真；通过对仿真结果的分析，给出了化工企业使用快切装置的建议。

在化工企业供配电设计中正确的评估和使用快切装置。

1. 单台电动机残压仿真分析

为验证ETAP软件的准确性,本文首先对单台电动机失电情况下的机端电压进行了仿真。仿真模型如图1所示。仿真时,利用ETAP的暂态分析模块,设置“事件”为同一时刻同时断开各电动机的配电断路器,得出其机端残压的衰减曲线,并进行相互对比。仿真结果如图2~图7所示。



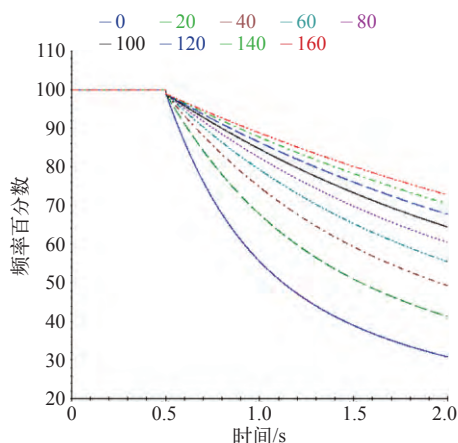


图2 不同转动惯量 频率-时间曲线

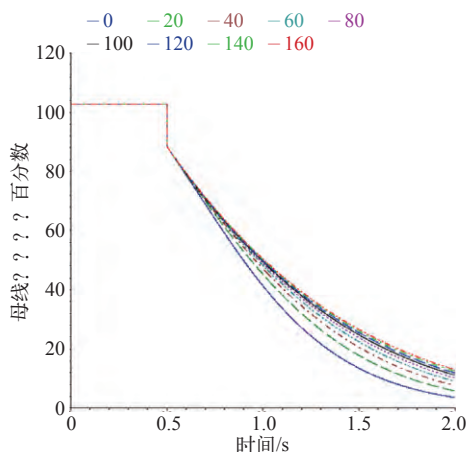


图3 不同转动惯量 幅值-时间曲线

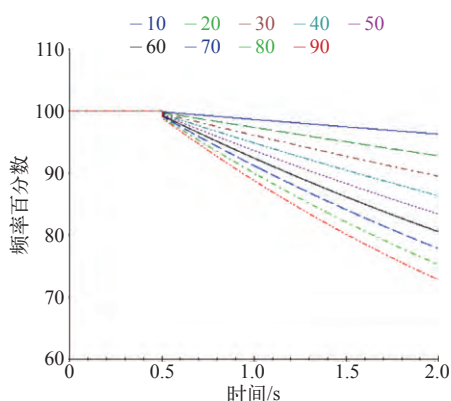


图4 不同负载率 频率-时间曲线

从仿真结果可以看出：

1) 各电动机参数相同，仅改变负载转动惯量时：转动惯量越大，机端残压频率衰减越慢；转动惯量对残压的幅值无明显影响。

2) 各电动机参数相同，仅改变各电动机的负载率时：负载率越高，残压频率衰减越快，相角差变化越快；负载率对残压幅值的衰减几乎没有影响，负载率越低，残压幅值起点越高。

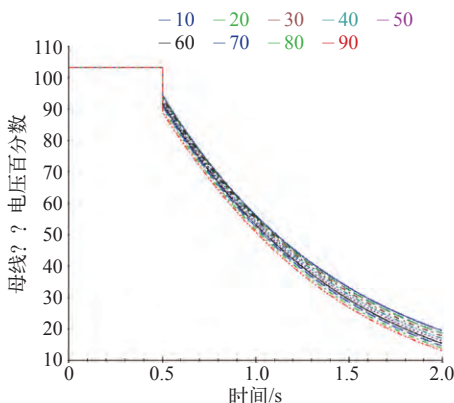


图5 不同负载率 幅值-时间曲线

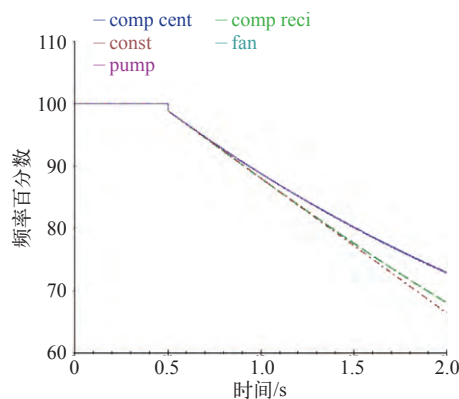


图6 不同负荷类型 频率-时间曲线

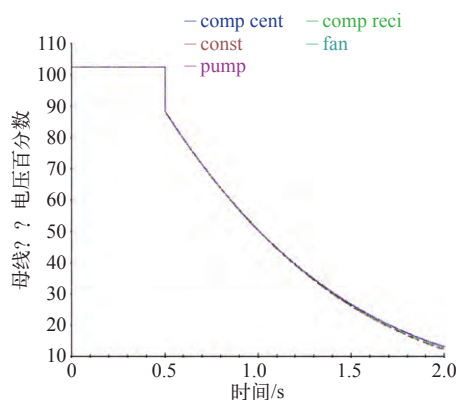


图7 不同负荷类型 幅值-时间曲线

3) 改变电动机负载类型（风机、泵、离心式压缩机、往复式压缩机、恒转矩）时：残压幅值基本不受影响；残压频率在起初10个周期基本保持一致。总的来说，在快速切换的时间范围内，负载类型的影响不大。

现有的理论分析认为：异步电动机突然失去外加电源后，定子电流突然降为零，转子则成为无源闭合电路，转子内电流将以断电瞬间的“初值”按转子的时间常数以指数衰减，同时转子惯性旋转，类似同步发电机，异步电动机机端将产

生一定的感应电压，其幅值由转子励磁电流大小决定，其频率由转子转速决定。上述仿真结果与现有理论分析结果一致。

2. 合闸判据分析

现阶段，对合闸判据均采用“电压耐受准则”，如图8所示，即电动机重新合上电源时

$$U_m = \Delta U \frac{X_m}{X_s + X_m}$$

式中， U_m 为电动机机端电压； ΔU 为差拍电压； X_m 为电动机阻抗； X_s 为系统阻抗。

上述做法通常令 U_m 为1.1倍电动机额定电压。从而得出图8中A'-A''左侧的不安全区域和B'-B''右侧的安全区域。当 $X_m/(X_s + X_m)$ 变化时，安全区域的界线在电动机耐受的冲击电流确定的允许极限A'-A''与B'-B''之间移动。

有文献针对电厂厂用电系统中的快切装置给出了快速切换的条件如下：

- 频率差小于2.0~3.0 Hz，且相位差小于20°~40°。
- 电压矢量差的幅值小于40~60 V。
- 电压矢量差与频率差之积小于80~180 V·Hz。

这两种不同的判定准则存在明显的差异，而哪种更适合应用于化工企业的供配电系统，需要进一步探讨。

本文仿真时，对单台电动机断开电源后，得到其残压-时间曲线及差拍电压-时间曲线；随后，从20°开始，每隔5°进行单台电动机的重合，分别得到各次重合时的冲击电流，仿真结果如图9所示。

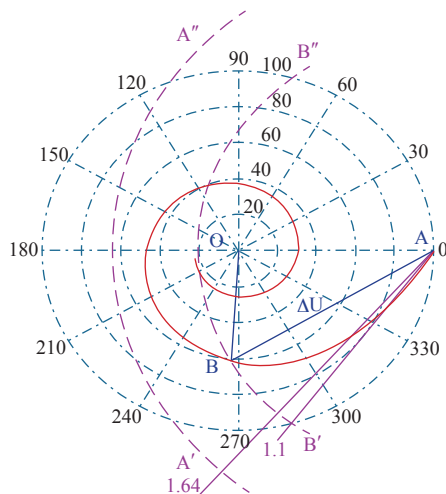


图8 电动机的残压特性曲线和

图9中，差拍电压以1.1倍电动机额定电压为基准；冲击电流峰值以1.1倍电动机额定电压直接起动的电流峰值为基准。

从仿真结果可以看出，重合过程的冲击电流峰值与差拍电压的幅值成正比。值得一提的是：仿真切换时，电动机机端电压均直接突变为系统电压。而由快切厂家返回的实测值也证实了此点。因而，第一种判据用一个简单的稳态分压公式来判定快速切换过程中复杂的电磁和机电暂态过程，存在一定的不足。当然，如果以重合冲击电流峰值 ≤ 1.1 倍额定电压下直接起动电流峰值为准则；则“电压耐受准则”有其实际意义，因为差拍电压更好测量。如果以断路器合闸时间按70 ms（相角变化约50°）来估算，则执行快速切换的条件与“电压耐受

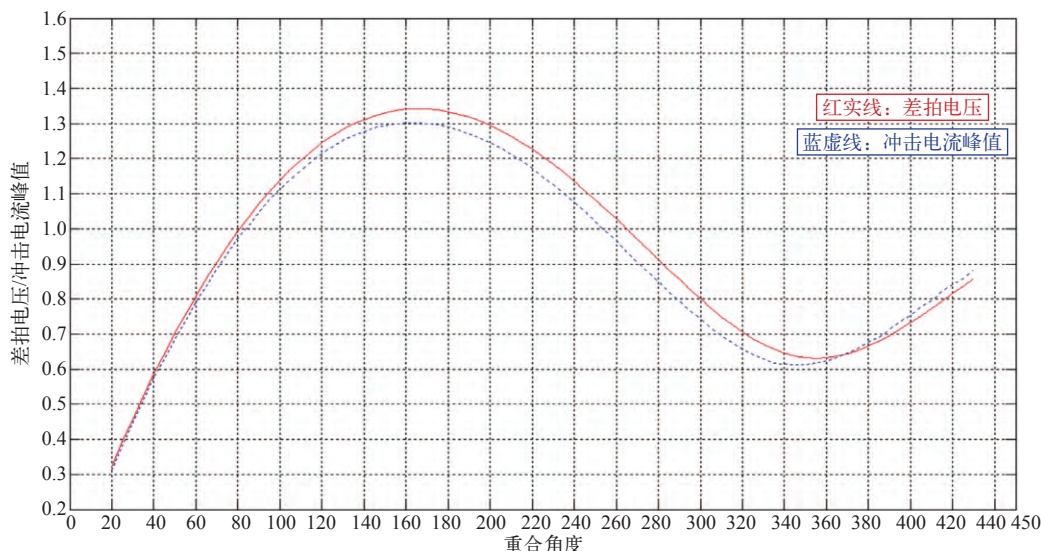


图9 重合角-冲击电流曲线

准则”基本一致。

3. 负载性质的影响

(1) 异步电动机和补偿电容器

本文以20 MV·A 35/10 kV变压器带10台2 000

kW异步电动机负载（负荷率70%）为例，分别仿真得到不设补偿电容器、设置1 800 kvar电容器和3 600 kvar电容器，直接断开母线进线开关时的差拍电压，如图10所示。

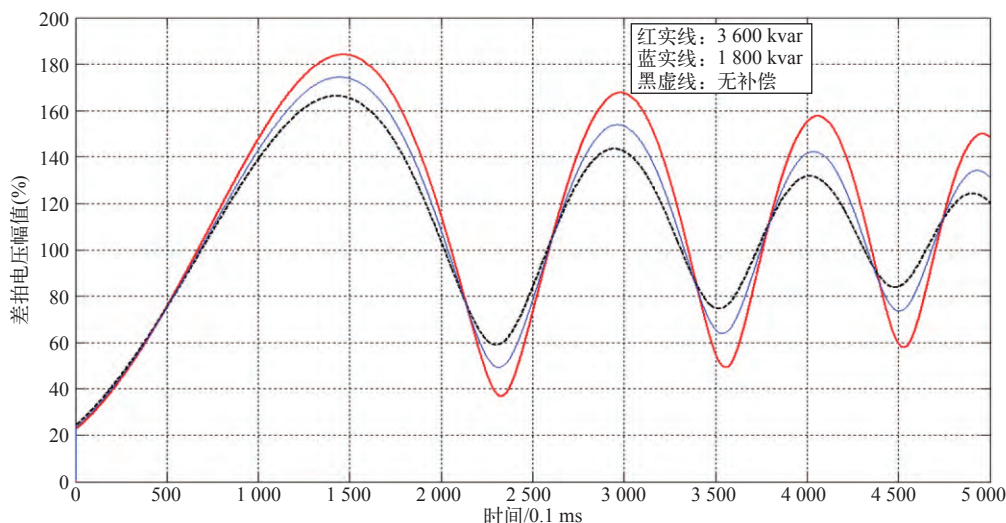


图10 差拍电压—无功补偿

从仿真结果可知，电容器对母线残压的频率没有影响，并使母线残压的幅值衰减较慢。因而，残压反向时，差拍电压的幅值更大，残压同向时，差拍电压的幅值较小；在100 ms以前，差拍电压无太大的区别，可以认为补偿电容器对母线残压是否满足快速切换的条件没有明显影响。对同期切换时，补偿容量越大，差拍电压幅值越小，切换时，冲击电流越小，因此补偿电容器对同期切换有益处。考虑快速切换完成的时刻差拍电压通常不超过1.1倍额定电压，而电容器具备一定的承受过电压的能力。从过电压的角度来看，快速切换对电容器没有不利影响。化工配电系统通常配置的串联电抗器均作为抑制谐波，电抗率远远大于限制补偿电流器涌流的要求；可以认为快速切换过程中，涌流不会超过20倍的限值。

总体来说，补偿电容器对快切装置使用有利。

(2) 异步电动机和同步电动机负载

本文以不设补偿电容器为基础，仿真母线上全为异步电动机和其中1台（2 000 kW）电动机为同步电动机，断开母线进线开关，分别得到差拍电压。

结果显示：有同步电动机时的母线残压在电压幅值上衰减的更慢，频率及相角没有太大差别；因此同步电动机的使用使得母线在快切执行

条件上与电容器一致。

另外，对有同步电动机的主接线，首先需要向工艺专业落实电动机的重要性！如生产过程不需要再同步，则主进线断路器联跳同步电动机。如生产过程需要再同步运行，则应向电动机制造商进一步讨论再同步的可能，及差拍电压、相角差、频率差的允许值。

(3) 变频调速电动机

本文以不设补偿电容器为基础，仿真时，将母线上一台电动机（2 000 kW）改由变频器供电，得出母线残压如图11所示。

从仿真结果可以看出，变频器的使用加剧了残压幅值的衰减，频率也衰减得更快。可以理解为：变频器在电压跌落至80%以前，能够正常输出功率，这将加剧母线电压的衰减（幅值、相角）；低于80%时，变频器退出，并且变频器所带的电动机将不再反馈（由于整流器的隔离作用）。因此变频器的存在不利于快速切换动作。

切换成功可能性分析

本文以某化工企业10 kV配电系统为例，分别仿真了各类故障/异常状态。仿真时，假定继电保护动作时间10 ms，快切装置动作时间为10 ms，断路器跳闸时间60 ms，断路器合闸时间70 ms；第一

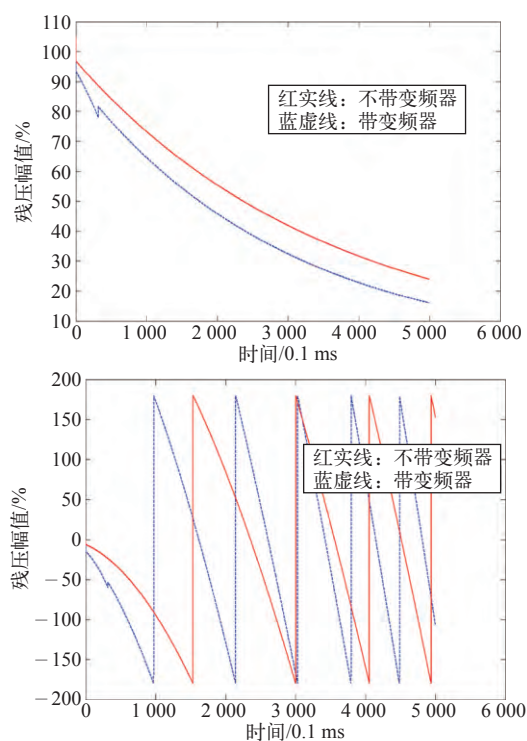


图11 母线电压—变频器

步，仿真各类故障/异常状态，得到相关的电流—时间曲线、电压—时间曲线；第二步，综合考虑上述时间因素及快切装置的快速切换条件，手动设置相关开关的分、合闸时间，得到仿真结果及分析见下表。

建议

综合上述仿真结果，不同故障类型、不同负载类型，快速切换有一定概率可以避免电网故障（异常）造成的化工装置停车（减产）。因此，在大中型化工项目中，工程设计时，均建议使用快切装置。小型项目可依项目投资等具体情况具体分析。

建议具体配置快切装置时，可在总变电所主变低压侧设置快切，在空分装置、锅炉装置等重要公用工程及局部停电会引起全厂大停车的装置，可再增设第二级快切。两级快切之间的配电线路、变压器差动保护信号去启动快切装置，从而保证快切动作的选择性，即外网故障，总变电

表 切换成功可能性仿真结果及分析

故障/异常类型	发生概率	是否满足快速切换条件	低压脱扣概率（母线低压幅值，持续时间）	停车概率
进线开关偷跳	极低	是	低（85%~70%，~100 ms）	低
上级出线开关误跳/偷跳	极低	否	高（85%~30%，~350 ms）	高
本段线路近端三相短路	极低	否	高（40%~10%，~400 ms）	高
本段线路近端单相短路	低	是	高（70%~55%，~160 ms）	较低
本段线路远端三相短路	极低	否	高（40%~8%，~400 ms）	高
本段线路远端单相短路	低	是	高（65%~45%，~160 ms）	高
相邻三相短路	极低	否	高（15%~5%，~400 ms）	高
相邻单相短路	相对最高	是	高（65%~40%，~260 ms）	高

所第一级快切动作；第一级与第二级之间的内网故障，下级变电所第二级快切动作。母线有大量变频器（如压缩机空冷岛风机）时，由于变频器对母线残压能量的消耗，通常残压不满足快速切换条件，不宜设置快切装置。

由于快切装置存在切换失败可靠能。即使电源切换成功，也不能保证低压接触器不脱扣；而检同期合闸更加不能保证低压接触器不脱扣；因此必须配合设置低压电动机抗晃电功能才能保证生产的连续性，工程设计时，可考虑使用抗晃电接触器、抗晃电电动机保护器、UPS控制电源等。

另外，本文未就有发电机的情况进行仿真。实际操作中，不建议带发电机的母线设置快切装

置；从而避免对发电机的非同步冲击。

结束语

本文由单台电动机残压入手，仿真分析了转动惯量、负荷率、负荷模型对单机残压的影响；仿真分析单机快切，验证了相关的快速切换条件的判据；同时仿真了电容器、同步电动机、变频器对母线残压的影响；最后分析了某化工企业10 kV配电系统在各类故障/异常状态下快切装置的使用结果。综合上述仿真及相关的分析结果，给出了化工企业使用快切装置的相关建议。EA

（收稿日期：2017.05.09）

（编辑：朱金凤）