快堆核电站电伴热元件的故障机理分析

电伴热系统作为快堆核电站的必备辅助系统，其安全性和可靠性直接影响到各加热工艺系统和设备的稳定运行。电伴热元件是电伴热系统的关键设备，接地短路和断路是其两个基本故障现象，两者的发生原因各不相同，但在发展过程中相互影响，为全面分析这两个基本故障的发生机理，需将两方面分析有机地统一起来。先分析了Y形和△形接线方式下的电伴热元件芯线轴向电压幅值分布及对绝缘性能的影响，结果表明接线方式对电伴热元件接地短路故障概率有较大影响；后分析了Y形接线方式下不同数量的电伴热元件断路故障的发展过程，即从同相单组断路故障发展为多组断路故障直至全相断路。基于上述分析成果，结合电伴热元件制造和安装过程中可能出现的问题，总体得出电伴热元件故障发展模式，并提出降低故障风险的解决方案。

刘　靖／中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究部
王新宇／环境保护部核与辐射安全中心

刘　靖／工程师

关键词／Keywords
快堆核电站·
电伴热系统·
电伴热元件·
故障机理·

0　引言

钠冷快堆核电站采用金属钠作为冷却剂，而钠的熔点为97.8 ℃，为了维持钠在液态从而能可控流动以进行热量传递和交换，必须对涉钠管道、阀门和设备进行加热或保温。相对于蒸汽伴热、油伴热、电磁感应伴热、趋肤效应伴热和电弧伴热等伴热方式，电阻式伴热系统（以下简称电伴热系统）具有高效、易控、易维护、成本低且结构简单等优点[1-4]，当今已广泛应用于石化[5]、船舶、航空航天、运输和水堆核电站[6]等领域。作为我国第一座钠冷快堆核电站，中国实验快堆采用电阻式伴热系统对涉钠工艺系统进行加热和保温，发挥了很好的作用。典型电伴热系统主要由工频交流供电设备、控制/监控设备和伴热元件组成，如图1所示。

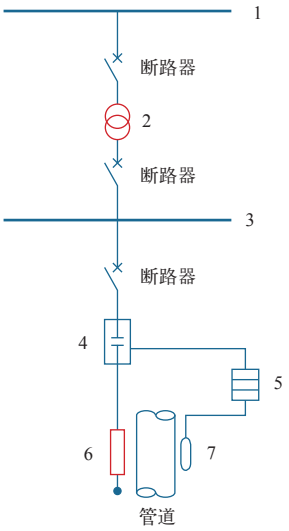


图1　典型电伴热系统示意图

1—中压母线　2—变压器　3—低压母线
4—电气控制设备　5—监控设备　6—电伴热元件
7—温度传感器

1）中压母线。作为核电站厂用电系统的一部分，一般为10 kV。

2）变压器。电伴热系统的专属设备，将中压母线电压变换为电伴热系统的通用工作电压。

3）低压母线。将电能直接分配至各电伴热控制回路，一般为380/220 V。

4）电气控制设备。主要包括快速熔断器和接触器/调压器，对下游的电伴热元件进行通断/调压控制。

5）监控设备。作为核电站全厂监控系统的一部分，主控室操作人员可依托电伴热监控设备对整个电伴热系统和各个控制单元进行监测和控制。

6）电伴热元件。直接安装在管道和设备外表面，采用直接接触导热方式。

7）温度传感器。对各加热管道和设备外表面进行温度采集，并将采集信号送至监控设备进行监测和控制。

电伴热元件全程伴随工艺系统和设备敷设，为了安装方便，伴热元件设计成可弯曲的线缆状元件，其结构如图2所示。

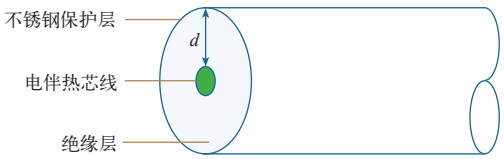


图2　电伴热元件结构

由于元件所处环境较为复杂，多为强电离、高电磁场和高温环境，且本身为发热器件，长期的使用过程中绝缘层容易老化导致绝缘性能下降，接地短路故障时有发生。单组元件长度能达到20～30 m，细长型伴热元件常出现断路故障，该类故障属不可修复类故障，如要更换耗时较长，并可能对工艺系统运行造成影响。

本文针对电伴热元件的接地短路和断路故障机理进行分析，采用相量法分析不同接线方式的电伴热元件发生接地短路和断路故障的原因，以及故障之间的相互联系，基于上述分析成果，结合现场运行反馈以及元件制造和安装等环节可能出现的问题综合得出电伴热元件故障发展模式，并提出降低故障风险的解决方案。

1　电伴热系统的供电和接线

1.1　电伴热系统的供电方式

考虑到电伴热系统的加热对象是涉钠工艺系统设备，为减少火灾隐患和接地短路电流对过程检测设备的影响，一般采用电源中性点不接地系统（IT系统），其中又包括电源中性点不引出中性线的三相三线制系统和电源中性点引出中性线但悬空不接地的三相四线制系统。

对于电伴热系统，三相四线制系统存在中性点（线）对地电位漂移的问题，该问题会导致系统中某相电伴热元件的工作电压高于设计电压（同时其他两相电伴热元件工作电压将低于设计电压），当达到一定限值时（保护器件动作限值或元件耐受限值），保护器件动作切断电源或伴热元件直接损坏，系统可靠性大大降低。即便中性点（线）对地电位漂移不严重，该电源所带所有三相负载将不平衡，总输出功率也会偏离设计值，系统运行在非正常状态。因此，三相三线制的IT系统较适合电伴热系统。

1.2　电伴热系统的接线方式

电伴热系统绝大部分负载为三相负载，根据所需加热功率的要求和设备外形尺寸的变化采用同相单组或同相多组电伴热元件。同相多组电伴热元件采用并联以保证可用性，不同相之间的电伴热元件可采用Y形或△形接线方式，如图3所示。

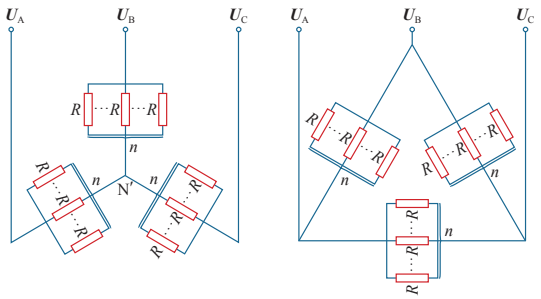


图3　电伴热元件的接线方式

为保证加热均匀性，同一负载下的电伴热元件阻值（R）要求相同，为保证三相供电平衡，三相电伴热元件数量（n）要求相同。

2　电伴热元件绝缘层耐受电压幅值

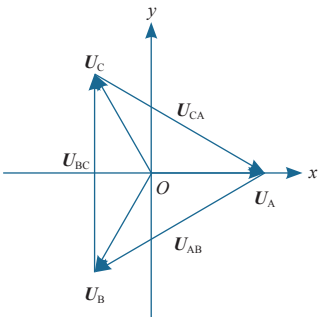
2.1　不同接线方式下电伴热元件绝缘层耐受电压幅值（不改变电源电压）

电伴热系统功率因数较高，可近似作为纯阻性负载考虑，设电伴热元件的长度为l（单位为m），电源端A相初始相位为0°，即$\boldsymbol{U}_A = U\angle 0°$（单位为V），则元件端电压矢量图和元件芯线轴向各点对地电压幅值如图4所示。

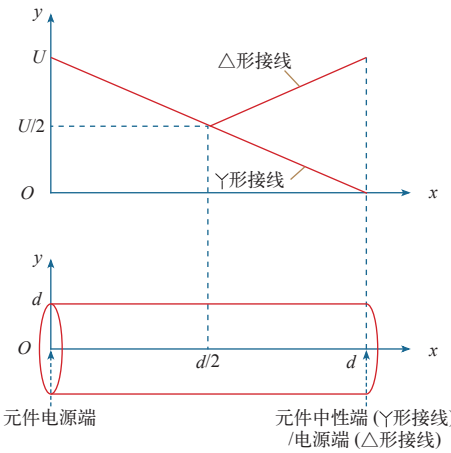
从图中可以看出，元件电源端对地电压幅值最大，经计算Y形接线元件平均电压幅值为$U/2$，△形接线元件平均电压幅值为$3U/4$。

2.2　不同接线方式下电伴热元件绝缘层耐受电压幅值（改变电源电压）

为保证电伴热元件稳定可靠工作，其发热功



（a）元件端电压矢量图



（b）电伴热元件芯线轴向各点对地电压幅值分布（电源电压不变情形）

图4　电伴热元件端电压矢量图和元件芯线轴向各点对地电压幅值分布（不改变电源电压）

率不能高于自身的限值（表面热负荷），而功率由施加其两端的电压决定。若电源电压不变，采用相同数量和相同规格的电伴热元件△形接线的总功率为Y形接线的3倍。

在针对工艺系统进行电伴热元件设计时，工艺系统所需加热功率确定好则需要的电伴热元件单根功率和元件数量也得以确定。若要改变接线方式并维持加热总功率不变，最便捷的方法是改变电源电压，此时Y形接线电源电压为△形接线的$\sqrt{3}$倍。设△形接线电源电压为$U_\Delta = U$，则Y形接线电源电压U_Y，元件芯线（导电部分）轴向各点对地电压幅值如图5所示。

可以看出，Y形接线方式下元件电源端电压幅值为△形接线的$\sqrt{3}$倍，经计算Y形接线元件平均电压幅值为$\sqrt{3}U/2$，△形接线元件平均电压幅值为$3U/4$，为Y形接线平均电压幅值的$\sqrt{3}/2$倍。

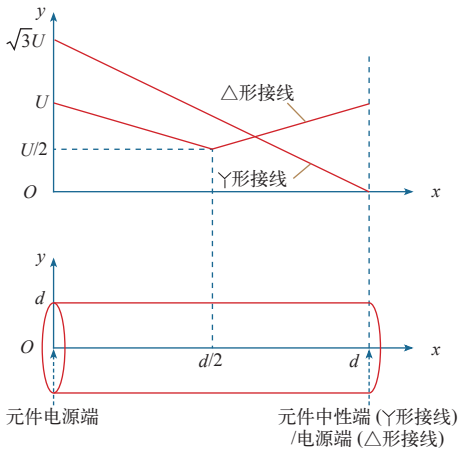


图5　电伴热元件芯线轴向各点对地电压幅值分布（改变电源电压）

2.3　接线方式对绝缘性能的影响

电伴热元件的绝缘层为固体电介质，其绝缘性能由电压种类和幅值、电压作用时间、电场均匀程度、温度以及湿度决定[7-8]。从上述分析可知，接线方式的改变会造成电压幅值和电场均匀程度（电压斜率）的变化，在功率相同的条件下，电压作用时间相同，而电压种类、温度和湿度也一致。

电压幅值越高、电场越不均匀，绝缘层绝缘性能下降越快。△形接线方式元件无论电压幅值的最大值还是平均值都低于Y形接线方式，△形接线方式电压幅值斜率也较Y形接线方式更小，电场更加均匀。因此，运行一段时间后，△形接线方式下的电伴热元件其绝缘性能将优于Y形接线方式。

电伴热元件发生接地短路故障的概率由元件的绝缘性能决定，绝缘性能下降则发生接地短路故障的概率越高。从图5可以看出，Y形接线的电伴热元件在电源端发生接地短路故障的概率最高，至元件末端最低，这同中国实验快堆现场运行反馈相符：2013年7月～2014年10月统计数据表明，电源端接地短路故障占总接地短路故障37.5%；△形接线的电伴热元件在两电源端发生接地短路故障的概率最高，至元件中点最低。

3　电伴热元件断路故障发展过程（Y形接线方式）

中国实验快堆所有三相电伴热元件负载均采

用Y形接线方式（见图3a），同相元件数量最多能达到10组（$n=10$），下面结合实际运用情况采用相量法分别进行分析计算。

3.1 初始条件—正常运行状态

正常状态下三相负载平衡，设三相负载阻值分别为R_A、R_B和R_C，令$R_A=R_B=R_C=R/n=R_0$，则负载中性点电压（矢量值）$\boldsymbol{U}_{N'}=0$，各相负载两端电压幅值相同，矢量图见图4a。

3.2 单相部分元件断路（设故障相为A相）

设故障元件数量为f，则A相故障后阻值为

$$R_A=\frac{n}{n-f}R_0 \tag{1}$$

负载中性点电压（相量值）为

$$\boldsymbol{U}_{N'}=\frac{\dfrac{\boldsymbol{U}_A}{R_A}+\dfrac{\boldsymbol{U}_B}{R_B}+\dfrac{\boldsymbol{U}_C}{R_C}}{\dfrac{1}{R_A}+\dfrac{1}{R_B}+\dfrac{1}{R_C}}=\frac{\dfrac{\boldsymbol{U}_A}{\dfrac{n}{n-f}R_0}+\dfrac{\boldsymbol{U}_B}{R_0}+\dfrac{\boldsymbol{U}_C}{R_0}}{\dfrac{1}{\dfrac{n}{n-f}R_0}+\dfrac{1}{R_0}+\dfrac{1}{R_0}}$$

$$=\frac{-f\boldsymbol{U}_A}{3n-f} \tag{2}$$

故障相元件两端电压$\boldsymbol{U}_{AN'}$为

$$\boldsymbol{U}_{AN'}=\boldsymbol{U}_A-\boldsymbol{U}_{N'}=\frac{3n}{3n-f}\boldsymbol{U}_A \tag{3}$$

令$\alpha=\angle-120°$，则其他两相元件两端电压为

$$\boldsymbol{U}_{BN'}=\boldsymbol{U}_B-\boldsymbol{U}_{N'}=\left[1+\frac{f}{\alpha(3n-f)}\right]\boldsymbol{U}_B \tag{4}$$

$$\boldsymbol{U}_{CN'}=\boldsymbol{U}_C-\boldsymbol{U}_{N'}=\left[1+\frac{f}{\alpha^2(3n-f)}\right]\boldsymbol{U}_C \tag{5}$$

从式（3）可以看出，部分元件断路时故障相元件两端电压随着故障元件数量f的增加而增加，而经过对式（4）和式（5）的实际计算，非故障相元件两端电压幅值将减小。当同相元件数量从$n=2$到$n=10$，故障相元件两端电压幅值变化情况如图6所示。

可以看出，同相多组元件Y形接线时，一旦发生元件断路故障，该相其他元件电压将超过设计值。同时，元件的单组功率也将大幅提升，功率变化情况如图7所示。

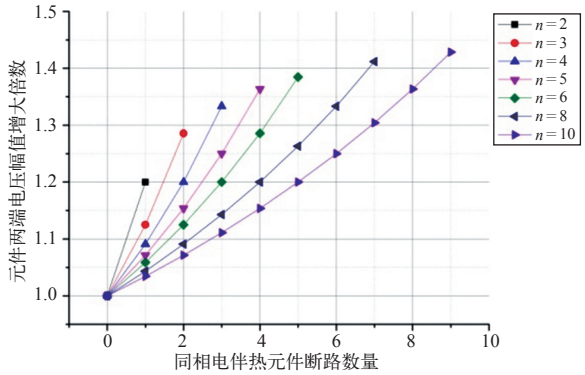


图6　电伴热元件部分断路时两端电压幅值增大倍数

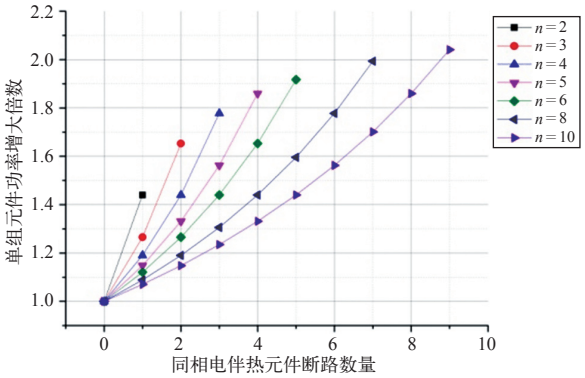


图7　电伴热元件部分断路时单组元件功率增大倍数

电伴热元件两端电压幅值增加会造成元件轴向电压变化斜率增大，电场不均匀程度增加。更重要的是，元件功率的大幅增加很容易使其超过最大功率限值，而此时过电流保护器件由于总电流减小将不能起到保护作用，元件持续过载并最终烧断，单相部分元件断路故障将最终发展为全相元件断路故障，此类故障已在现场运行中得以反馈。

4 电伴热元件故障发展模式

4.1 接地短路故障与断路故障之间的联系

电伴热元件不锈钢保护层和被加热设备需全程可靠接触并接地，绝缘层绝缘性能持续下降（主要是老化、吸潮和外力撞击）泄漏电流增大并发热，发展到热击穿阶段，将导致电容性接地短路，与元件自身发热量叠加后造成局部过热，超过发热功率限值元件即烧断。实际运行中接地短路故障和断路故障在同组元件同时发生已见反

馈：2013年7月～2014年10月运行数据表明，接地短路故障和断路故障同时发生占所有故障17.6%。对于同相多组Y形接线元件，单组元件断路将导致其他组元件电压和功率增加，引起同相多组元件断路，接地短路故障的风险增大，接地短路故障和断路故障相互促进。

4.2 其他因素对故障的影响

电伴热元件在正常工作中维持着热量平衡：发热量必须通过与之接触的管道或设备传递出去，导热面为两圆弧面的接触面（线），其余的导热部分为空气，当元件与管道或设备在某部位接触不良时（安装不紧密或热膨胀变形），由于空气导热相对于金属导热效率过低，元件将持续过热甚至烧断。

对于较长的电伴热元件，生产加工过程中绝缘层厚度和芯线直径均匀性难以保证，绝缘层如存在厚度不均、含有杂质等问题时容易形成绝缘缺陷，芯线直径不均匀会造成电阻不均匀，部分区段发热功率偏大。这些因素都会增加电伴热元件发生故障的风险。

4.3 综合考虑多种因素的故障发展模式

综合考虑以上多种因素的影响，分析得出电伴热元件的故障发展模式，如图8所示。

从图8可以看出：①电伴热元件故障分为断路故障和接地故障两种不同的发展模式；②△形接线方式电伴热元件的两种故障相对独立，单组元件断路不会导致多组元件断路故障；③Y形接线方式电伴热元件的两种故障相互影响，元件断路故障有导致接地短路故障的风险。

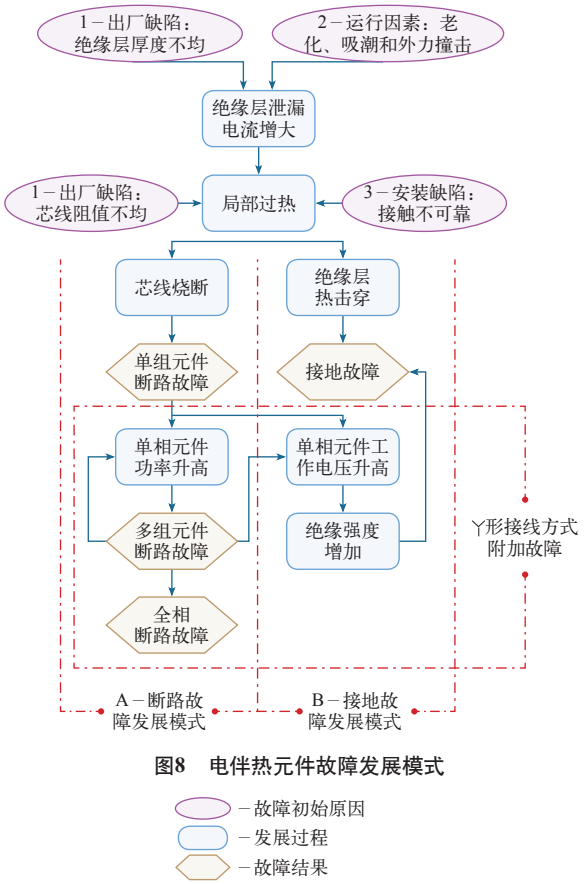


图8 电伴热元件故障发展模式

5 结束语

经过上述分析，可得出如下结论。

1）Y形接线方式下元件电源端电压幅值为△形接线的$\sqrt{3}$倍，元件平均电压幅值为△型接线的$2/\sqrt{3}$倍。△形接线方式下的电伴热元件其绝缘性能将优于Y形接线方式。

2）Y形接线方式下单组元件断路将导致其他组元件电压和功率增加，增大同相其他元件故障风险，断路故障有扩大的趋势，△形接线方式则无此风险。

3）Y形接线方式电伴热元件断路故障有导致接地短路故障的风险。

4）电伴热元件故障还受制造、安装和运行过程中诸多因素的影响，应有针对性地采取措施降低故障风险：元件绝缘层应采用憎水性材料，并具备良好的抗老化性能，尤其是元件接头处绝缘，应重点防护，同时还应进行优化设计，改善其电场分布；元件安装前全面检验其绝缘层和芯线的均匀性，安装时做到紧密接触，杜绝元件干烧，对于不平滑的设备表面，采用传热性好的金属材料填充，加大接触面。

5）本文分析方法和结果可为后续快堆电站电伴热系统以及其他应用场合电伴热系统设计和研究提供参考。

(下转第85页)

机检修，发现输出级齿轮对有一个齿出现断齿，如图7所示。

图7 齿轮箱故障图片

4 结束语

所设计的主传动链振动数据采集系统可采集大量数据用于风机状态监测与故障诊断并实现稳定可靠的数据上传。为推进风机故障预测分析的研究、基于数据融合的风机故障诊断的研究奠定基础，为其提供充足的数据源。

参考文献

[1] 汪光阳，周义莲．风机振动故障诊断综述 [J]．安徽工业大学学报：自然科学版，2006 (1)：64-68.

[2] 龙泉．风电机组齿轮传动系统动态特性及故障诊断方法研究 [D]．北京：华北电力大学，2012.

[3] 李辉，胡姚刚，李洋，等．大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述 [J]．电力自动化设备，2016 (1)：6-16.

[4] 辛卫东，马志勇，滕伟，等．振动监测技术在风电机组齿轮箱故障诊断中的应用 [J]．中国电力，2012 (5)：77-80.

[5] 冯志鹏，褚福磊．行星齿轮箱齿轮局部分布式故障振动频谱特征 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (5)：118-125.

[6] Jae Yoon，David He，Brandon Van Hecke．On the use of a single piezoelectric strain sensor for wind turbine planetary gearbox fault diagnosis [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2015，62 (10)：6585-6593.

[7] Thomas Bruce，Hui Long，Rob S Dwyer-Joyce．Dynamic modelling of wind turbine gearbox bearing loading during transient events [J]．IET Renewable Power Generation，2015，9 (7)：821-830.

（收稿日期：2016－12－11）EA

(上接第20页)

参考文献

[1] Eriksson C J．Electric heating of pipelines with variable resistance wire [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，1972，IA-8 (5)：572-577.

[2] Eriksson C J．Electric heating-take another look [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，1980，IA-16 (5)：641-648.

[3] Barth R E，Johnson B C，Guthrie T K．Electric heat tracing design from a temperature perspective [C]．IEEE Industry Applications Magazine，1995，1 (5)：4-8.

[4] Brooks D，Drozd P，Graff D，et al．Reducing the final cost of ownership of electricheat tracing systems in Northern Alberta [C]．Petroleum and Chemical Industry Conference，2000：173-186.

[5] 姚传进，雷光伦，吴川，等．高凝油井电伴热优化计算 [J]．石油学报，2010，31 (5)：843-848.

[61] 唐芳轩，周千盛，曾利民，等．核电厂辅助电加热锅炉电极套管故障原因及其处置 [J]．核动力工程，2010，31 (3)：110-112.

[7] 梁曦东，陈昌渔，周远翔．高电压工程 [M]．北京：清华大学出版社，2006.

[8] 胡细保，郗亮，谭智勇，等．高频高压大功率变压器优化设计方法研究 [J]．电气工程学报，2016，11 (6)：40-47.

（收稿日期：2016－02－10）EA