

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 电气系统分析	3
4.1 典型研究概述	3
4.1.1 厂外暂态稳定性分析	3
4.1.2 潮流研究	3
4.1.3 暂态和动态研究	3
4.1.4 短路研究	3
4.1.5 电气保护配合	3
4.1.6 防雷保护	4
4.2 核电厂不同工况下分析的适用性	4
4.2.1 概述	4
4.2.2 建议	4
4.3 分析工具的选择、验证和确认	5
4.3.1 概述	5
4.3.2 建议	5
4.4 电气系统模型	6
4.5 核电厂的并网	6
4.6 分析的更新	6
4.7 实施电气研究的先决条件	7
4.8 验收建议	7
4.9 其它建议	7
5 厂外电力系统暂态稳定性分析	7
5.1 概述	7
5.2 分析建议	7
5.3 验收建议	8
6 厂内交流电气系统分析	8
6.1 概述	8
6.2 潮流研究	8
6.2.1 概述	8
6.2.2 研究建议	8
6.2.3 验收建议	8
6.3 暂态研究	9
6.3.1 概述	9
6.3.2 故障工况	9
6.3.3 母线切换	9
6.3.4 电动机启动和再加速	10

6.3.5 孤岛运行	10
6.3.6 电压扰动	11
6.3.7 投切和故障引起的过电压	11
6.3.8 负荷加载	12
6.4 故障研究	12
6.4.1 短路研究	12
6.4.2 接地故障（绝缘劣化）	13
6.5 电气保护配合	13
6.5.1 研究建议	13
6.5.2 验收建议	13
7 直流及交流不间断电源系统分析	14
7.1 潮流研究	14
7.1.1 概述	14
7.1.2 研究建议	14
7.1.3 验收建议	14
7.2 暂态研究	14
7.2.1 充电器	14
7.2.2 逆变电源/UPS 和旁路开关	15
7.3 故障研究	15
7.3.1 短路研究	15
7.3.2 接地故障（绝缘劣化）	16
7.4 电气保护配合	16
7.4.1 研究建议	16
7.4.2 验收建议	16
8 其它分析	16
8.1 防雷保护	16
8.1.1 概述	16
8.1.2 研究建议	17
8.1.3 验收建议	17
8.2 电磁兼容性	17
8.2.1 概述	17
8.2.2 研究建议	17
8.3 谐波研究	17
8.3.1 概述	17
8.3.2 研究建议	17
8.4 铁磁谐振	17
附录 A（资料性）建立核电厂电气系统设计基础	错误!未定义书签。
附录 B（资料性）分析性研究指南	错误!未定义书签。
附录 C（资料性）设计依据和设备选型验证	错误!未定义书签。
附录 D（资料性）特定核电厂验收准则示例	错误!未定义书签。
参考文献	错误!未定义书签。

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件使用重新起草法修改采用 IEC 62855:2016《Nuclear power plants-Electrical power systems-Electrical power systems analysis》编制。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国核仪器仪表标准化技术委员会（SAC/TC30）提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：深圳中广核工程设计有限公司、生态环境部核与辐射安全中心、中国核电工程有限公司、上海核工程研究设计院股份有限公司。

本文件起草人：孙辉、张清良、翟长春、陈小伟、宋鹏飞、张奇、孔静、蔡晶慧、马涛、倪丹。

核电厂电气系统分析指南

1 范围

本文件提供了适用于核电厂交流和直流电气系统的分析指南。电气系统分析用于证明电源及配电系统能够支持核电厂的安全运行和停堆，支持核电厂在发生预计运行事件或事故后，能够进入可控状态并最终达到安全状态。

本文件适用于：

- 验证新建核电厂的设计；
- 论证在运核电厂电气系统重大改造的充分性及影响；
- 评估和确定在运核电厂的运行限值和约束条件；

本文件的有关条款也适用于退役阶段核电厂。

本文件不适用于：

- 电气系统中使用的数字式控制器（如用于充电器、逆变器、负荷加载和电气保护装置等控制元件）；
- 可能会影响设备选型或保护要求的环境条件（如温度、湿度等）及外部事件（如地震、洪水、火灾、高能电磁脉冲等），但包含雷电和地磁暴外部事件；
- 对独立电源系统的附加或特殊建议，例如作为核电厂安保措施的供电电源；
- 通过采用统计学或多样性及冗余性方案来提高核电厂电气系统可靠性的内容；
- 电气系统安装、维修和运行过程中人身安全保护措施建议，以及常规人身安全建议。

分析中使用的方法或工具包括：

- 经过验证和确认的仿真工具（软件和硬件）；
- 人工计算；
- 试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 15544（所有部分） 三相交流系统短路电流计算

GB/T 50057 建筑物防雷设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

备用电源 standby AC power source

当丧失优先电源和主发电机时，可在任何预计运行事件和事故工况下为核动力厂提供必要的动力供应的电源。

[来源：HAD102/13-2021，5.3]

3.2

功率平衡 power balance

电气系统所需的稳态有功功率和无功功率。

注：本文件为电气设备（配电盘、电缆、电源、变压器、蓄电池、充电器/逆变器等）定容提供了基础。

3.3

孤岛运行 house load operation

核电厂只向其自身用电负载供电的运行工况。

3.4

替代交流电源 alternate AC source

设置在核电厂内或其附近的一种交流电源且满足下述要求：

- a) 它可以接到（但通常不连接）厂外或厂内应急交流电力系统；
- b) 与优先电源或厂内备用电源共模故障概率最小；
- c) 全厂断电后能及时供电；
- d) 有足够的容量和可靠性使全厂断电时所需要的所有系统运行，并保证安全停堆和维持安全停堆时限内用电（超设计基准事故）。

[来源：GB/T 13177-2008，3.2，有修改]

3.5

全厂断电 station blackout

核电厂内重要的和非重要的配电装置母线全部失去交流电源（例如，在失去厂外电源的同时，汽机脱扣并且厂内应急交流电源故障），但是未失去由蓄电池经过逆变或替代交流电源供给的交流电源。

[来源：HAD102/13-2021，3.4，有修改]

3.6

丧失厂外电源 loss of off-site power

核电厂的所有安全级母线同时断电，需启动备用电源向安全级母线供电。

注：不包括直流系统和交流不间断电源系统的安全级母线。

3.7

设计扩展工况 design extension conditions

不在设计基准事故考虑范围的事故工况，在设计过程中应该按最佳估算方法加以考虑，并且在该事故工况的放射性物质释放在可接受限值以内。设计扩展工况包括没有造成堆芯明显损伤的工况和堆芯熔化（严重事故）工况。

[来源：HAF 102-2016]

3.8

优先电源 preferred power supply

在事故和事故后工况下，从输电系统优先给安全级电力系统供电的电源。

[来源：GB/T 13177-2008，3.4]

3.9

总谐波畸变率 total harmonic distortion (THD)

周期性交流量中的谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比（用百分数表示）。

[来源：GB/T 13177-2008，3.8]

4 电气系统分析

4.1 典型研究概述

4.1.1 厂外暂态稳定性分析

输电线路短路、突然切机或甩大负荷等电网扰动会引发不稳定性。如果未能及时切除这些扰动，不稳定性可能会导致部分丧失或完全丧失优先电源。暂态稳定性分析用于证明核电厂能耐受电网的扰动并保持并网，而不会导致发电机失步。

4.1.2 潮流研究

潮流研究的输入为各种功率平衡数据，其目的是确定电气系统稳态运行情况，确认在各类工况下系统电压是否均处于规定的限值范围内。通过本研究确定：

- a) 各馈线的压降；
- b) 母线电压；
- c) 负载电压；
- d) 所有分支和馈线回路的潮流。

4.1.3 暂态和动态研究

备用电源启用及加载、大型电动机启动及运行、发电机调压故障等现象可能引发故障或扰动。当电气网络内发生故障或扰动时，通过暂态研究确认电气系统的电压、电流、功率和频率。在发生此类扰动期间及之后，通过这些动态研究：

- a) 研究旋转机械和电气设备的性能；
- b) 验证旋转机械和辅助电气设备的可运行性。

4.1.4 短路研究

通过短路研究确定电气系统各点的最大短路容量，保证现有设备及新设备的选型合理；同时，还能确定最小短路电流，以验证电气保护系统的灵敏度。

4.1.5 电气保护配合

为最大程度地减少设备损坏,通过电气保护系统监测电气故障并做出响应,隔离电气系统故障部分,从而最大程度地降低对人员、设备及核电厂的危害;同时,保持供电的连续性和可用性,维持电气系统的稳定。

通过保护配合研究确认从负载上游至电源所有保护装置的选择性。为实现电气系统保护的选择性,在选择或设置保护装置时,建议比较保护装置在各种电流、电压和频率下的动作时间。

4.1.6 防雷保护

防雷保护系统旨在减少直击雷可能产生的后果。通过研究确定雷击后电压和电流的幅值,以验证防雷保护方案及设备的性能。

4.2 核电厂不同工况下分析的适用性

4.2.1 概述

在核电厂正常运行工况,安全级母线一般由优先电源通过非安全级母线供电。因此,电气系统验证分析宜涵盖电气系统所有相互影响的部分,包括核电厂所有运行和停堆模式下的电网、发电机及非安全级系统。

4.2.2 建议

建议如下:

- a) 作为设计验证的一部分,宜开展如下分析并持续到未来的改造中。
 - 1) 通过稳态和暂态分析,验证电气系统符合下列要求:
 - 在最不利的假定负载和最低允许的系统电压和频率工况下,能够为核电厂安全系统供电,并使其实现预期功能;
 - 满足针对预计运行事件和设计基准工况的设计要求;
 - 采取了充分的措施应对全厂断电等设计扩展工况;
 - 采取了充分的措施应对可能危害厂内和厂外电源的外部电气事件。
 - 2) 证明较高安全分级的系统被充分地保护以免受到低安全分级系统的影响,例如:
 - 故障蔓延;
 - 由电气共因故障始发的事件;
 - 过载。
 - 3) 当厂外电源回路为安全级负载供电时,证明其符合可靠性和可用性要求。当核电厂接入电网的输电及发电设施发生计划性调整时,有必要重新开展论证;
 - 4) 当厂外电源回路为安全级负载供电时,证明厂外电源在下列情况下仍能满足容量和性能要求:
 - 核电厂解列;
 - 丧失电网中最大发电机组;
 - 丧失最大输电线路或互联线路;
 - 丧失最大负载。
- b) 分析宜涵盖核电厂所有的运行方式和事件,例如:
 - 1) 正常运行:

- 启动；
 - 功率运行；
 - 停堆；
 - 断电；
 - 换料；
 - 维修；
 - 试验。
- 2) 预计运行事件：
- 机组跳机/全容量甩负荷；
 - 丧失厂外电源；
 - 丧失主发电机电源。
- 3) 设计基准事故
- 4) 设计扩展工况：
- 全厂断电。
- c) 宜在电网公司的协助下开展厂外电源回路的容量和性能分析。

4.3 分析工具的选择、验证和确认

4.3.1 概述

根据预设条件，宜采用系统性方法，通过仿真准确地建立要求，并通过现场测量或其它多样性及替代性方法独立验证仿真结果。

建议根据拟实施的研究范围、拟模拟的现象及拟分析电气系统的复杂性，选用分析软件。针对大型工业用电气系统分析而开发的大部分在售商用软件都能用来模拟核电厂所有主母线和负载，并开展由设计方确定的最小范围系列分析。

本文件不推荐任何特定软件。

4.3.2 建议

建议如下：

- a) 为建立电气系统设计基准，在选用软件时宜考虑下列要求：
- 1) 制定并维护符合标准的质量保证流程；
 - 2) 为检查软件是否符合规范并实现其预期功能，仿真软件及研究经过验证和确认（V&V），并：
 - 出具 V&V 报告；
 - 定义经过 V&V 的范围（在该范围，该工具得出的结果与另一种经确认的工具或试验结果之间的偏差不会影响其预期功能）；
 - 文件妥善存档。
 - 3) 提供仿真工具（软件版本号、用户配置、其它设置和参数）详细的、正式的描述。
- b) 为完成拟采用软件的 V&V，包括功能验证，宜满足下列要求：

- 1) 功能验证证明软件工具的架构不存在错误;
- 2) 通过认证证书或质保审查报告证明功能验证的有效性, 并充分参考功能验证所用的文件;
- 3) 功能验证让用户确信在软件定义的运行范围内, 等效仿真能准确地模拟物理现象;
- 4) 通过对比仿真结果与下列结果, 完成功能 V&V:
 - 试验结果;
 - 其它经功能确认过的仿真工具、人工计算、以往经验及类似工作所得结果, 如必要, 建议补充专家的反馈与评估。

注: 上述内容建议纳入质保计划。

- a) 针对拟采用仿真软件及其运行环境的任何重大变更, 用户宜分析其影响。如果试验结果或功能 V&V 合格, 则建议使用新版软件, 并记录存档。

注: 通常软件配置管理包括上述内容。

- c) 为保证正确使用合格软件, 宜编制用户指南, 以使不同用户:

- 1) 识别:
 - 利用该软件能够开展的不同类型的研究;
 - 有效范围与物理现象一致的模型;
 - 必要的输入数据。
 - 2) 将输入数据转换为软件能够识别的信息格式 (采用经过质量检查的电子表格);
 - 3) 创建必要的文件以实施仿真;
 - 4) 获得一致的结果。
- b) 证明实施仿真研究的人员接受了充分的相关培训并具有匹配的资质。

4.4 电气系统模型

仿真模型宜适用于有关研究, 并清晰地识别、确认在分析中采用的物理模型的假设条件及约束条件。推荐至少采取如下措施:

- 仿真模拟主要交流母线、电缆、变压器及所有限流装置。对于大型系统, 通常将具有类似特征的负载 (如旋转负载、静止负载) 分组, 然后等效为“集中负载”, 此集中负载效果等效于各独立负载产生的影响;
- 对于暂态稳定性研究, 详细模拟主发电机及其调节器 (电压和转速)、升压变压器、大型电动机及核电厂附近的电网。推荐将整个电网简化为一个经技术论证的等效系统。

4.5 核电厂的并网

在核电厂设计中, 宜开展厂外电力系统相关的分析研究, 并评估对厂内电气系统的影响。建议分析研究涵盖所有的预期电源回路及核电厂运行工况, 以评估厂外电力系统的设计及运行能够支持核电厂在所有工况下安全运行。

为满足核电厂设计要求, 宜综合评估厂外电源的性能和容量, 并进行例行审查, 以充分评估厂内或厂外电力系统任何变更对核电厂电气系统的影响。

宜分析验证电压及频率波动范围在核电厂设计要求范围内。

4.6 分析的更新

在下列情况下，宜确认现有分析与工程现状的符合性，或重新开展分析：

- 厂内或厂外电气系统实施了重大变更或改造；
- 许可证延续或定期安全审查期间。

在核电厂下列改造中，宜开展电动机启动研究：

- 迁移厂内负载；
- 更换电动机（运行特征可能不同）或发电机。

4.7 实施电气研究的先决条件

在开始研究之前，宜确定下列参数：

- 电气设备的初始额定值；
- 功率平衡；
- 核电厂各种运行模式及已识别的最严苛的运行工况。

为确定最严苛的运行工况，建议考虑下列组合的不同工况：

- 由厂内或厂外电源供电运行；
- 最大和最小短路容量；
- 最高和最低电压范围；
- 最高和最低频率范围；
- 核电厂各种运行模式；
- 核电厂最高和最低功率平台；
- 考虑了所有运行负载及环境条件的最大和最小负载；
- 电力系统最大和最小阻抗；
- 电气设备发生单一故障后的运行模式；
- 电源之间的负载切换。

4.8 验收建议

验收标准宜基于核电厂特定的技术基准。若不能满足验收标准，则建议证明未对核安全造成不利影响，否则建议进行设计变更。

4.9 其它建议

附录 A-D 分别给出了如下资料性信息，建议予以关注：

- a) 建立核电厂电气系统设计基础；
- a) 分析性研究指南；
- b) 设计依据和设备选型验证；
- c) 特定核电厂验收准则示例。

5 厂外电力系统暂态稳定性分析

5.1 概述

在遭受剧烈扰动后，输电系统的恢复对于核电厂安全、可靠运行而言至关重要。针对不会导致核电厂发电机失步的扰动，宜开展电网暂态稳定性分析，确定在这些扰动下核电厂穿越并保持并网的能力。建议联合电网公司开展分析并确定部分参数，如故障切除时间等。

5.2 分析建议

宜开展暂态稳定性分析，以模拟电力系统运行状况，并确定对系统稳定性的影响。

5.3 验收建议

针对已被电网保护方案切除的故障，主发电机能保持并网且不失步。主发电机宜完全符合电网规范的要求，除非偏差已取得电网公司同意。若电网规范要求核电厂具备穿越暂态扰动的能力，则建议根据要求开展论证。

6 厂内交流电气系统分析

6.1 概述

本条款适用于中、低压交流电气系统（非逆变器或交流不间断电源（UPS）供电），包括备用电源和替代交流电源。

6.2 潮流研究

6.2.1 概述

核电厂不同的电厂配置和电源组合（见 4.7 节）会构成多种运行模式。潮流研究是通过分析核电厂在多种运行模式下的电气参数和状态，证明电气系统的设计满足所需性能要求。

6.2.2 研究建议

建议如下：

- a) 为评估母线及旋转设备终端电压、电流和功率分布，开展交流系统潮流研究，以模拟电气系统在正常、异常和应急工况下的实际稳态；
- b) 通常电网规范规定了核电厂在连续发电或短时发电时能够承受的电压范围；建议评估在不同运行模式下，电网高电压和低电压对核电厂电气系统产生的影响。若采用有载调压分接开关，则建议在潮流研究予以考虑；
- c) 评估发电机与电网解列（即停运和启动模式）时，厂内配电系统的电压范围；
- d) 下列情况在潮流研究中应予以考虑：
 - 1) 极端运行工况：验证在最大及最小负载的极端运行工况下，包括核电厂正常运行和停堆工况，厂内电源和厂外电源是否满足负载需求；
 - 2) 偶然性工况：比如线路停运，厂外电源的变压器和发电机停运，同时厂内辅助系统（包括事故后用以缓解放射性后果的设备）处于最大或最小负载。

注：建议在设计优化过程中开展分析研究，并考虑例如下述核电厂参数的安全裕度：

- 变压器分接头和阻抗；
- 发电机励磁特性；
- 无功补偿装置；
- 电缆选型。

6.2.3 验收建议

潮流研究结果宜符合：

- a) 各种电气设备的功率潮流特性（包含裕度）；
- b) 所有电气设备运行容许的电压范围。

6.3 暂态研究

6.3.1 概述

为评估电气暂态过程，例如发生电气故障或关键部件随机失效导致电气系统扰动后的母线电压幅值、相角、电流和频率，宜开展交流电气系统暂态研究。

6.3.2 故障工况

6.3.2.1 研究建议

建议如下：

- a) 在核电厂各种运行工况下，当发生外部或内部事件后，评估厂内母线的暂态及稳态电压和频率。此外，还建议评估相位偏移对连接负载及其控制回路的影响；

注：此处的相位偏移指两个（或多个）量之间的相位差变量。

建议考虑以下典型事件：

- 1) 电网事件，例如，通过主保护或后备保护切除的短路和接地故障；
 - 主发电机、主变压器或厂用变压器的短路和接地故障；
 - 厂内电气系统的短路和接地故障（建议采用敏感性分析识别极端工况）；
 - 频率波动。

注：以上所列并非详尽无遗。根据核电厂的具体设计标准，可能也有必要开展其它故障研究。

- b) 分析交流供电系统的对称故障和不对称故障对电动机、充电器和逆变器等电气设备产生的影响。这包括厂内故障和厂外故障，还建议考虑恢复电压的影响。确认保护装置能有效监测并切除电气系统发生的故障；
- c) 对于导致安全级设备动作或跳闸的电气系统扰动，宜分析大型电动机的重新启动或再加速时间，并证明电气保护装置不会误动，以防止触发安全级设备的自动功能。

6.3.2.2 验收建议

暂态研究宜验证以下内容：

- a) 保护装置能有选择性地及时监测并切除电气扰动导致的系统故障；

如果系统扰动导致断电，则建议评估与后备电源投入相关的加载时序，保证事故处理系统的投入时间不超过安全分析中容许的时限；

示例：如果厂外电力系统断电，为保证应对设计基准事故而启动和运行安全系统所用的总时间在可接受的时限内，建议确认切换至孤岛运行、后备厂外电源或厂内备用电源后的响应时间。

- b) 电气系统的频率、电流和电压符合设备选型及性能要求（包括绝缘要求），跳闸设备不超过其额定开合能力。

6.3.3 母线切换

6.3.3.1 概述

电网或核电厂发生的扰动、断路器失灵保护或操作员操作都能触发母线切换。

6.3.3.2 研究建议

建议开展母线切换研究。

6.3.3.3 验收建议

母线切换研究宜验证以下内容：

- a) 为防止旋转机械发生电压失步问题，慢速切换时母线残余电压足够低；
- b) 为保证用电设备能同时启动或重新启动，在母线切换成功后，核电厂的用电设备（尤其是感应电动机）的端电压足够高；
- c) 核电厂辅助设备（如安注泵等）的启动和/或再加速时间满足事故工况下的安全分析要求及系统运行需求；
- d) 在最极端的运行工况下，电气系统运行相关的保护装置（如过流保护或欠压保护等）不会触发误跳闸；
- e) 在电动机启动或重新启动后，所有电气设备运行在允许的电压和频率范围内。

6.3.4 电动机启动和再加速

6.3.4.1 概述

电动机（尤其是大型电动机）的启动电流会导致设备端（及其配电盘）电压大幅下降，并可能会因启动扭矩过低或厂用电系统其它在运电动机堵转，导致电动机启动失败。电动机启动研究宜考虑最严苛的负载和电源工况。

6.3.4.2 研究建议

建议如下：

- a) 将电动机启动研究作为暂态分析的一部分，并涵盖所有可能的运行工况；
- a) 分析母线切换后或厂内电气系统电压跌落后的电流曲线和电压曲线，并确定在变压器和电缆中的电压降。

6.3.4.3 验收建议

电动机启动和再加速研究宜验证以下内容：

- a) 所有感应电动机的启动或重启不能导致下列后果：
 - 启动期间感应电动机的堵转；
 - 其它电动机的堵转；
 - 母线切换至备用厂外电源；
 - 厂内备用电源的启动。
- b) 启动或重启后感应电动机的电压满足设备技术规格书的要求（特别是与电压和启动时间相关的要求）；
- c) 在假定的最严苛工况下（见 4.7），感应电动机的启动时间符合：
 - 安全分析中规定的时间要求；
 - 运行约束条件；
 - 保护系统的定值。
- d) 在电动机启动后，电气设备运行在允许的电压和频率范围内。

6.3.5 孤岛运行

6.3.5.1 概述

部分核电厂具备孤岛运行能力，即仅带厂用电负载运行。孤岛运行由电网或开关站故障始发，切换至孤岛运行将导致发电机终端及厂内电气系统发生电压和频率波动。

6.3.5.2 研究建议

建议分析孤岛运行电压和频率波动对厂内电气设备的影响。如果电压和频率变化超出设计范围，建议分析对敏感电子设备（如充电器和逆变器）的影响；同时，还应关注对电子式电气保护装置造成的影响。

6.3.5.3 验收建议

孤岛运行研究宜验证以下内容：

- a) 在切换至孤岛运行期间及之后，电气设备的频率和端电压满足设备规范和性能的要求；
- b) 切换至孤岛运行不能导致下列后果：
 - 电机失速；
 - 母线切换至厂外电源；
 - 备用电源的启动。

6.3.6 电压扰动

6.3.6.1 概述

电压扰动示例包括：电压降低、电压不平衡（如断相）、电压跌落和电压中断。电压扰动可能导致核电厂冗余用电负载发生共因故障失效。

6.3.6.2 研究建议

建议如下：

- a) 为开展电压保护配合分析，将电压扰动研究作为暂态分析的一部分；
- b) 研究工况包括在正常电源和备用电源中发生的对称性和非对称性故障（如断相）。电压保护配合方案研究工况包括在空载、轻载和满载运行期间发生电压扰动的情况。

6.3.6.3 验收建议

电压扰动研究宜验证以下内容：

- a) 电压保护的设置（电压和时间）能保证设备在降级的电压运行条件下不会退出运行；
- b) 电压保护方案能保证安全级母线在电压降低到无法接受的水平后，能断开故障电源并切换至后备电源。

6.3.7 投切和故障引起的过电压

6.3.7.1 研究建议

建议如下：

- a) 将过电压研究作为暂态分析的一部分。此外，还建议考虑快速电压瞬态；
- b) 通过研究证明电气系统的快速暂态扰动不会造成系统损坏或解列。以下特殊现象应予以关注：
 - 投切感性负载；
 - 投切容性负载；
 - 电流截断；
 - 中性点不接地电气系统的接地故障。

关于雷击引起的过电压，见 8.1。

6.3.7.2 验收建议

通过绝缘配合，保证设备过电压不会超过电气设备的耐压水平。

6.3.8 负荷加载

6.3.8.1 研究建议

建议如下：

- a) 开展备用电源负荷加载研究，通过数学模型仿真和评估原动机响应时间、母线电压幅值、相角、电流和频率等。
- b) 开展动态分析，以证明：
 - 所有负载均能按预定的加载时序投入运行；
 - 加载时间间隔能保证在加载下一步序负载之前母线电压和频率已恢复至预期的范围；
 - 电动机启动电流在允许的限值内。
- c) 当备用电源作为厂内唯一电源时，负荷加载研究宜验证加载期间的频率波动情况。

注：负荷加载期间会出现频率暂态，只要暂态时间足够短，对水泵流量的影响通常可以忽略不计。

6.3.8.2 验收建议

负荷加载研究宜验证以下内容：

- a) 在感应电动机加载期间，频率波动和电压波动不会导致厂内其它负载失效；
- b) 已带载或重新启动的感应电动机的端电压满足设备技术规格书中的要求（特别是与电压和启动时间相关的要求）；
- c) 在假定最严苛的电压、频率和负载条件下，感应电动机的启动时间满足在安全分析中确定的假设和准则；
- d) 电气保护系统的定值设置考虑了最严苛工况下的电压、频率和负载条件；
- e) 在完成加载后，电气设备能运行在额定的电压和频率范围内；
- f) 在完成上一步加载后，备用电源的频率和电压能在规定时间内恢复至允许下一负载投入的范围内；
- g) 方案设置优先考虑投运用于执行安全停堆功能的设备。

6.4 故障研究

6.4.1 短路研究

6.4.1.1 概述

为确定故障工况下最大和最小短路电流，建议根据 GB/T 15544（所有部分）开展短路电流计算，核实电气设备的短路耐受能力，并校验保护方案的灵敏度和选择性。

短路故障可能是对称故障或不对称故障，也可能是接地短路故障或者是相间短路故障。

6.4.1.2 研究建议

建议如下：

- a) 短路故障可能发生在任意时间，或发生在任何工作电源的运行模式下，以下因素应予以关注：
 - 备用电源并网试验期间发生短路故障；
 - 大型感应电动机对电气系统故障电流的显著贡献。
- b) 通过短路电流计算，选择开关设备、电缆和其它电气设备额定值。

6.4.1.3 验收建议

对称性短路和不对称短路计算结果宜符合：

- a) 所有电气设备的最大故障电流耐受能力；
- b) 开关装置的开断能力。

6.4.2 接地故障（绝缘劣化）

6.4.2.1 概述

接地故障可能导致电压不平衡、电流不平衡，以及绝缘劣化风险或设备过热风险。

6.4.2.2 研究建议

建议开展接地故障研究，以验证电气系统能监测相对地绝缘劣化故障。考虑所有运行电源在任意时刻对故障的贡献是十分必要的。

6.4.2.3 验收建议

如果在发生接地故障后电气保护不动作于跳闸（如高电阻接地或不接地系统），则建议证明电气设备在此故障下仍能够执行其预期功能。

6.5 电气保护配合

6.5.1 研究建议

建议如下：

- a) 电气保护方案对所有可用电源和所有负载均具有充分的选择性。对于特定工况下某些电源（如备用电源）和用电设备，为保证其执行核安全功能，电气保护仅投入应急保护功能。在正常运行暂态工况下保护装置不能误动作，如电动机启动冲击电流、操作过电压、变压器励磁涌流等；
- b) 电气保护配合能保证实现电气系统保护设定最优。所有可能的运行工况是保护整定计算中考虑的重要因素，包括备用电源运行工况。为防止故障进一步扩大，保护设置能断开最靠近故障点的开关是至关重要的。以此，能保障未受故障影响部分的持续供电，从而将故障影响最小化；
- c) 过流保护方案考虑的重要因素：
 - 最大暂态运行电流（见 6.3）；
 - 最小短路故障电流（见 6.4）。
- d) 低电压保护和不平衡电压保护方案能防止安全系统设备（主要是旋转电机）过流跳闸。电气保护系统能提供耐热极限保护、负序保护（即不对称故障）和不对称直流分量电流保护。针对核电厂各部件及其运行工况下的不平衡运行状态，电气保护系统也能提供相应保护；
- e) 当发生电压降低或电压不平衡时，安全级电气系统能在适当地延时后，切断电压降低电源，并切换至其后备电源。当电压监控采用表决策略（通常为三取二逻辑）时，设备配置和测量原理能够监测到电源发生此类电压降低；
- f) 为证明整个电气系统能应对过电压，对所有的电压保护系统进行配合研究；
- g) 在监测到接地故障时，电气系统能发出报警或跳闸，并推荐针对接地故障开展电气保护配合研究。

6.5.2 验收建议

电气保护配合研究宜验证以下内容：

- a) 能选择性地隔离故障回路；
- b) 能监测到电压降低或不平衡电压，并采取缓解措施；
- c) 能防止电气系统受到过电压侵害；

- d) 在执行事故缓解功能期间或应急运行模式期间，评估对安全重要设备的跳闸操作是否影响其安全功能的执行。

7 直流及交流不间断电源系统分析

7.1 潮流研究

7.1.1 概述

直流及交流不间断电源系统潮流研究是电气系统分析的重要部分，旨在评估系统在正常、异常和应急工况下的运行能力及限制边界条件。

注：通常情况下，直流及不间断电源系统的峰值负载发生在事故触发信号叠加丧失厂外电源的时刻。

在丧失厂内和厂外交流电源的工况下，直流及交流不间断电源系统（直流电源供电）能维持足够的母线电压是至关重要的。

7.1.2 研究建议

建议如下：

- a) 通过潮流研究中直流系统负载的持续运行时间分析，验证以下内容：
 - 蓄电池容量；
 - 电气元器件或回路负载；
 - 蓄电池均衡充电、涓流充电（浮充）和放电期间的母线及负载的电压。需注意的是，在浮充或均衡充电时，母线及负载的电压不能高于所连接负载的额定值；
 - 正常和应急运行工况下（包括冲击电流）的负载电压。
- b) 根据负载曲线，分析蓄电池在预期放电时间内为负载供电的能力。在蓄电池寿期末，评估在最低允许环境温度下各负载电压特性，并建议考虑以下因素：
 - 在蓄电池定容及其保护装置定值设定时，考虑瞬时负载的影响；
 - 部分负载（如断路器跳闸或合闸线圈）的冲击电流和总电流可能会持续几秒钟。基于保守考虑，这种同时带载的负载持续时间按整一分钟计算，且在这一分钟内叠加其它此类负载。
- c) 通过开展交流不间断电源系统（UPS 或逆变电源）潮流研究，验证：
 - 电气元器件或回路负载；
 - 正常、异常和应急工况下的负载电压（考虑从母线到负载的压降）；
 - 在寿命末期的蓄电池容量（制造商提供蓄电池寿命、放电曲线、终止电压及老化至寿期末的时间）；
 - 在最低允许环境温度下各负载的电压特性。

7.1.3 验收建议

通过潮流研究宜验证以下内容：

- a) 蓄电池的容量符合设计要求；
- b) 在事故发生的第一分钟内或在其它峰值负载投入后叠加丧失交流电源的工况下，瞬时电压满足所有待投入负载的启动和运行要求；
- c) 蓄电池容量能够满足在丧失交流电源后所有需投运负载的启动和稳态运行要求。

7.2 暂态研究

7.2.1 充电器

7.2.1.1 研究建议

建议通过开展 6.3 描述的暂态研究，验证当交流电气系统在可接受的电压暂态期间，直流系统电压能维持在可接受的范围内（试验或仿真）：

- 电压跌落并中断，后恢复至标称电压；
- 电压跌落并中断，后恢复至高电压；
- 过电压暂态；
- 充电器谐波输入；
- 在未连接蓄电池的情况下运行（通常不能在未连接蓄电池的情况下长期运行），此研究目的是为设备维修或计划停运留出时间。

7.2.1.2 验收建议

建议验证以下内容：

- a) 为防止对直流系统或 UPS 系统的功能造成不利影响，能够将整流装置交流侧的扰动抑制或限制到可接受的水平；
- b) 直流系统或 UPS 系统的功能性指标不会因电压扰动而降低，如为充电器供电的交流系统出现操作过电压或浪涌电流引起的电压扰动。

7.2.2 逆变电源/UPS 和旁路开关

7.2.2.1 研究建议

建议如下：

- a) 通过开展 6.3 描述的暂态研究，验证 UPS 系统在交流电气系统电压暂态期间输出电压保持在可接受的范围内：
 - 电压中断并恢复至标称电压；
 - 电压中断并恢复至高电压；
 - 过电压。

为防止对为安全级负载供电的 UPS 系统安全功能造成不利影响，能够将整流装置交流侧（包括高压电网）的扰动抑制或限制到可接受的水平。

- b) 通过开展 6.3 和 8.1 描述的过电压研究，验证过电压不会导致旁路开关失效。

注：例如反向过电压。

7.2.2.2 验收建议

UPS 系统的功能性指标不能因电压扰动而降低，例如为 UPS 系统供电的交流系统出现瞬时失电、操作过电压或冲击电流引起的电压扰动。

7.3 故障研究

7.3.1 短路研究

7.3.1.1 研究建议

为验证在最大和最小短路电流工况下，系统均能在可接受的时间内监测到任意短路故障，并切除故障或动作于报警，建议开展短路研究。

7.3.1.2 验收建议

短路研究宜验证以下内容：

- a) 直流及交流不间断电源系统的保护装置能监测系统中所有的短路故障状态；
- b) 结果不能超过设备额定值；
- c) 在确定短路故障回路跳闸时，考虑了直流及交流不间断系统为核电厂安全级设备供电的安全功能；
- d) 为切除短路故障，交流不间断电源系统能为保护装置提供合适的电流。

7.3.2 接地故障（绝缘劣化）

7.3.2.1 研究建议

对于未直接接地的直流及交流不间断电源系统，需特别考虑在单相或单极故障工况下运行的情况。建议通过对这些系统的接地故障研究，验证在安全级设备发生任何误动或丧失前，已监测到绝缘劣化。

7.3.2.2 验收建议

如果在发生接地故障后电气保护不动作于跳闸，则建议证明电气设备在此故障下仍能够执行其预期功能。

7.4 电气保护配合

7.4.1 研究建议

建议如下：

- a) 各级可用电源的电气保护具有充分的选择性。在故障发生后，通过短路研究确定在不同时间流经电气系统的电流大小，并评估保护装置（如测量元件、熔断器和断路器）的选型和整定。接地故障电流的大小取决于电气系统的接地方式；
- b) 为防止进一步损坏设备，电气保护方案能快速地、有选择地触发最靠近系统故障点的开关断开是至关重要的，即保护方案能选择性断开最小范围电气系统，并保证系统中未受影响部分的持续供电。为实现电气系统在所有运行工况（包括备用电源供电）下的高可用性，可通过保护配合确定最佳整定值；
- c) 为防止安全级系统设备因过载保护跳闸而导致的设备失效，电压保护方案能及时动作；
- d) 低电压保护装置能及时报警，并在恰当时机切换至后备电源；
- e) 电气系统具备过电压保护，并对整个系统开展保护配合分析；
- f) 在事故缓解期间或应急运行模式期间，评估保护装置对安全重要设备的跳闸操作是否满足安全分析中的安全功能要求。

7.4.2 验收建议

除非安全功能要求持续运行，否则建议有选择性地切除故障回路。

8 其它分析

8.1 防雷保护

8.1.1 概述

雷击：

——建筑物顶部；

- 核电厂附近；
- 输电线路路上。

可能会对电气和电子系统造成干扰和破坏。

推荐采用设计预防措施来缓解雷击造成的后果，例如采用法拉第笼、等电位连接网、变压器、电缆屏蔽、电缆敷设工程和额外防雷保护装置（如需）等。

雷电防护装置宜符合 GB/T 50057 的要求。

8.1.2 研究建议

为保证低于所保护装置的电磁抗扰度水平，雷电防护装置宜充分降低雷击效应。防雷保护研究的模型和仿真工具宜适用于研究高频现象。

8.1.3 验收建议

建议通过开展充分假设的防雷保护分析，证明雷击引起的过电压不会损坏安全级设备，且低于设计基准值，并证明雷击引起的感应电压/感应电流在设计限值内。

8.2 电磁兼容性

8.2.1 概述

建议从电磁发射和/或电磁抗扰度角度规定电气设备的电磁兼容鉴定要求。同时，基于良好实践的应用措施也十分重要：

- 隔离；
- 布线；
- 电缆屏蔽；
- 有效的建筑/房间/面板屏蔽；
- 接地系统。

8.2.2 研究建议

建议在设计评估中验证与这些设计要求的一致性。

8.3 谐波研究

8.3.1 概述

因在电气系统中采用变频驱动和电力电子开关电源，宜考虑谐波的产生、传播和其与其它负载的影响。

8.3.2 研究建议

针对配电系统，建议研究与母线连接的非线性负载产生的谐波干扰和非正弦电流的传播。建议评估公共连接点处的总谐波畸变率（THD）以及 THD 对公共连接点所连接负载的影响，并评估对母线直连负载的影响，以保证其性能规范考虑了 THD 要求。

8.4 铁磁谐振

建议证明核电厂已充分采取降低铁磁谐振风险的措施。

附 录 A
(资料性)
建立核电厂电气系统设计基础

A.1 概述

核电厂在反应堆停堆后很长一段时间内仍会持续释放大量热量。一般情况下，反应堆在刚停堆时的热功率约为停堆前功率的 7%，在 1 小时后降至 2% 以下，在 1 天后降至 0.5%，并将持续降低。因此，反应堆冷却系统必须在反应堆停堆后继续运行数天，以防止过热对反应堆堆芯造成损坏。因此，需设计可靠的冷却系统，并为其配置可靠且具有多样性的电源。根据不同核电厂的设计，大部分安全功能或所有安全功能均需依靠电力。

根据纵深防御理念，在优先电源不可用时应切换到后备电源。

在分析电气系统从优先电源切换到替代电源的响应时，宜考虑电压、时间和电流的相关准则。需要开展的研究举例如下：

- 在失去厂外交流电源后，电厂转至孤岛运行的电源切换研究；
- 当主发电机故障或主厂外交流电源不可用时，转至辅助厂外交流电源的电源切换研究（如厂用变压器切换至辅助变压器）；
- 当主厂外交流电源、辅助厂外交流电源和主发电机发生故障时，转至备用电源（应急电源）的电源切换研究；
- 在备用电源（应急电源）故障时，转至替代交流电源（全厂断电事件）的电源切换研究。

需根据核电厂不同的特性来确定电气设计基准。附录 A 提供了在电厂设计时需考虑的准则，并在电厂后续实施改造时复核。此外，在核电厂寿期内，电厂连接的外电网和电源条件也可能发生变化，相关变化对核电厂厂内电气系统的影响也需进行评估。更多关于核电厂电气系统设计的准则见 HAD 102/13《核动力厂电力系统设计》。

核电厂电气系统设计基准需定义电气系统的功能、功能所必要的特性、性能目标、运行和环境条件以及可靠性要求。

电气设计基准宜涵盖所有运行模式，并考虑所有可能的电气与机械系统的相互影响，包括电动泵的情转、电源切换暂态、电动机启动暂态、内外部事件扰动等可能导致电气系统潮流和电压波动的情况。电气设计基准还建议考虑正常、异常和设计基准事件时的温度、压力、湿度等环境条件。

附录 A 提供的指南侧重于电气设计基准，不包括由于环境条件（即温度和湿度等）或外部事件（地震、洪水、火灾和高能电磁脉冲等）等因素而引起的可能影响设备额定值或防护要求的其它考虑，但包括了雷电和地磁暴等外部事件。相关输入和确定过程如图 A.1 所示。

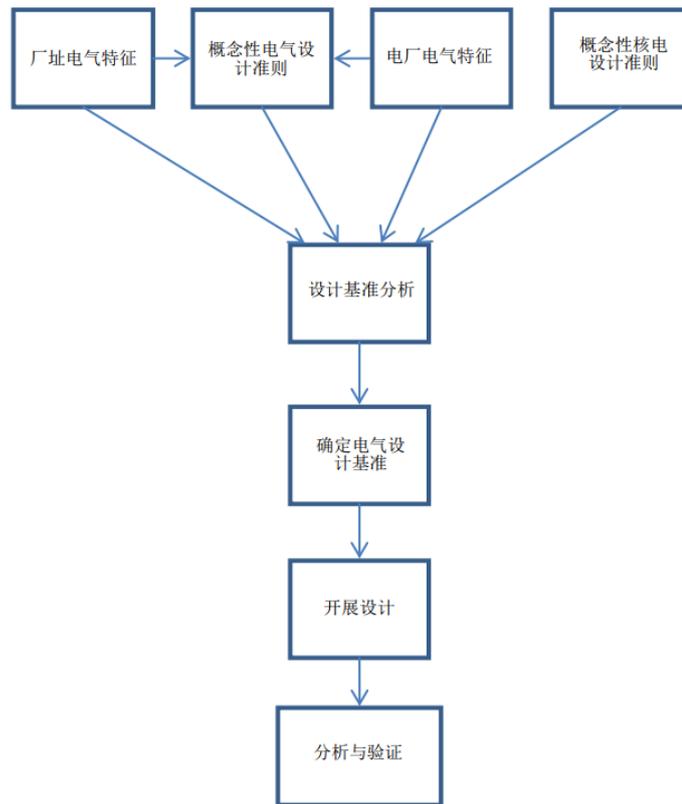
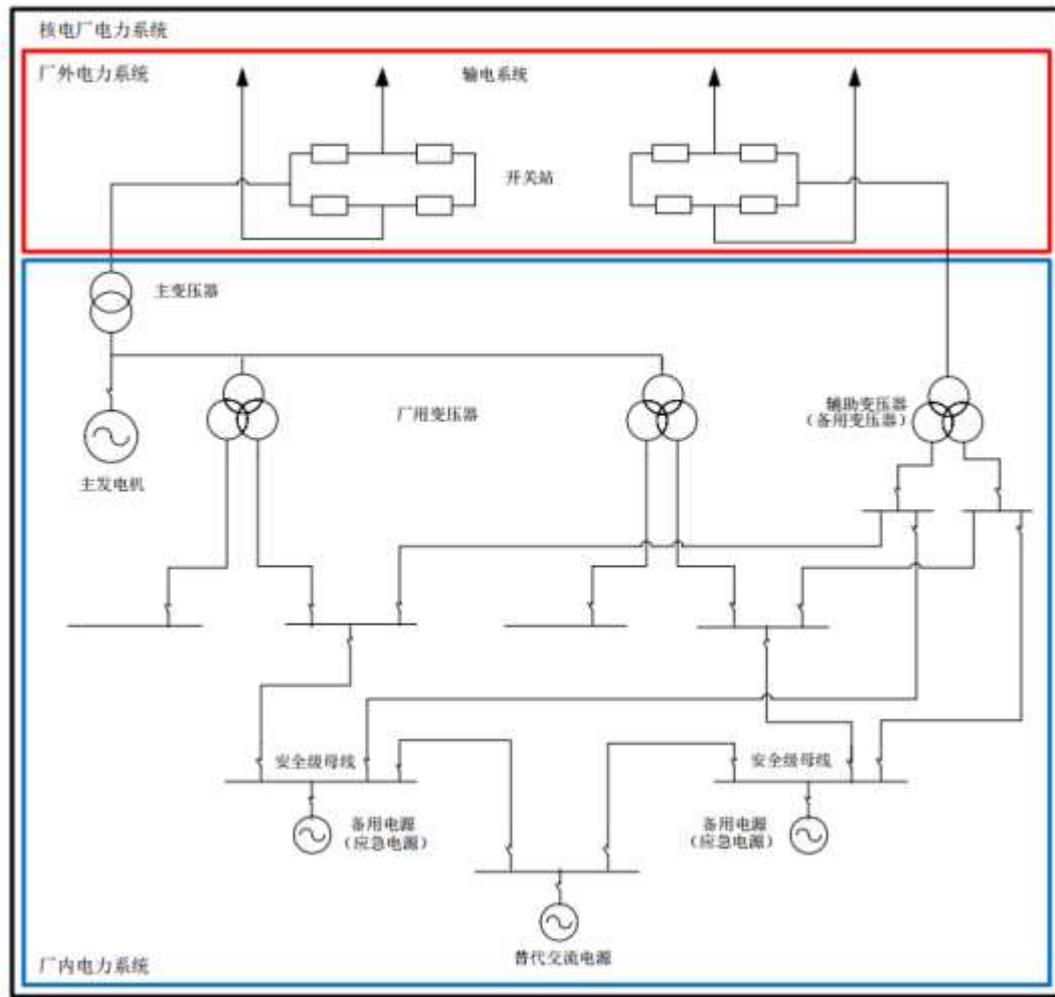


图 A.1 确定核电厂电气设计基准的输入以及分析与验证的过程

在正常运行期间，核电厂安全级电气系统一般由非安全级电气系统提供电源，并为非安全重要负载提供电源。图 A.2 示意了核电厂电力系统、厂外电力系统和厂内电力系统之间的关系。图 A.3 示意了核电厂安全重要电源、安全级电源及优先电源之间的关系。

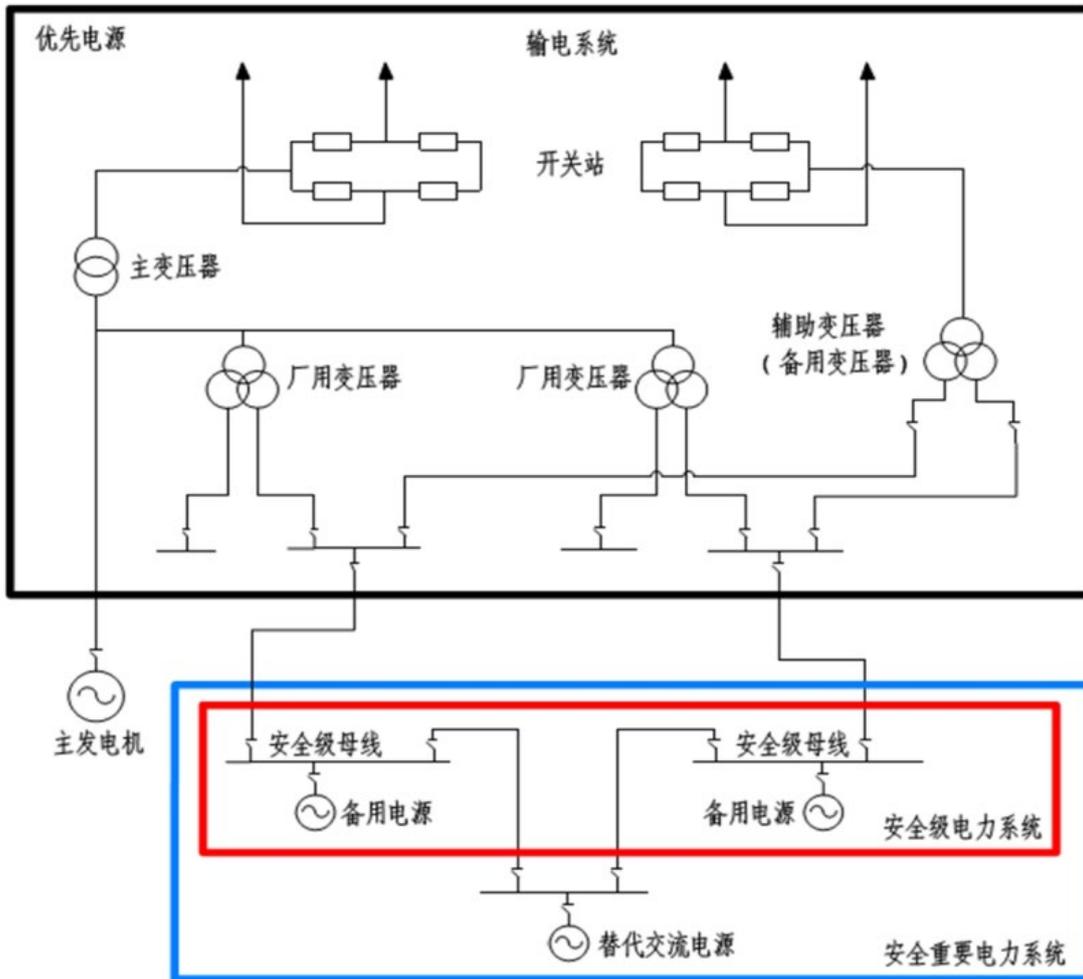
为保证安全系统供电的可靠性，宜为核电厂所有电气系统确定设计基准，且电气系统分析宜涵盖系统中所有相互作用的情况。对于多机组电厂，宜考虑各种电源配置方式以及正常运行和异常运行工况。

核电厂的换料停堆或计划性维修停堆通常在电网低负载运行、输电系统运营商对核电厂发电功率要求较低时进行。在电网低负载运行工况下，电网的电容特性叠加核电厂最小厂用电负载可能会导致厂用电母线的电压升高。在这种情况下需评估对核电厂用电设备启动及运行的影响。



注：本图仅作为示例，实际的核电厂电气系统设计包括母线、负载、发电机和交叉互联等的不同配置与定义等内容。本图未包括电气系统的所有要素（例如直流系统等）。

图 A.2 核电厂电力系统、厂外电力系统和厂内电力系统之间的关系



注：本图仅作为示例，核电厂电气系统设计包括母线、负载、发电机和交叉互联等的不同配置与定义等内容。此外，厂内电气系统的诸多元素并未在图中体现，如非安全相关的母线和直流电气系统等。本图仅用于示意安全重要电气系统与优先电源之间的关系。优先电源没有划分到安全重要电气系统的部分不属于电厂分级的范畴。安全重要电气系统所包含的部件会随着不同电厂的设计以及分级方法有所不同。部分核电厂的设计可能不需要安全级备用电源。所有核电厂都需设计安全级直流电源。来源：HAD102/13。

图 A.3 电厂安全重要电力系统、安全级电力系统和优先电源间的关系

A.2 厂址电气特性

A.2.1 概述

相互联接的电气系统是一个庞大而复杂的网络，系统的不同部分之间存在固有的联系。因此，系统内即使物理距离较远的部分之间也可能以非预期的方式互相影响。厂内电气系统受其所处的电网环境、厂内负载和自身系统配置的影响。

电气系统分析与电网及厂内电气系统的运行方式密切相关。通常宜对系统的稳态运行工况和扰动动态工况进行分析。

在稳态运行分析中，假定扰动引起的瞬态已经趋于稳定，系统处于平衡状态。包括输电线路损耗在内的系统负载与发电量相等，即系统频率是恒定的。

厂址特定的电气系统研究宜涵盖所有预期的输电系统配置方式和电厂运行模式，以确定设备额定值并设计可靠的厂外电气系统。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/977116160006010003>