

电力系统自动化设备的电磁兼容技术探究

李亦欣, 王浪群

(国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000)

摘要 现代电力系统的自动化程度不断提高, 各种电子设备和通信技术被广泛应用于电力系统的监测、控制与保护之中。但自动化设备在提高电力系统运行效率的同时, 也带来了电磁兼容性的问题, 不但对设备自身的稳定运行产生影响, 还对整个电力系统的安全构成威胁。因此, 深入探究电力系统自动化设备的电磁兼容技术具有重要意义。本文对电磁兼容技术进行简要概述, 并对电力系统自动化设备电磁兼容问题进行分析, 进而对其相关电磁兼容技术与应用进行探讨, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 电磁兼容技术; 自动化设备; 电力系统; 电磁干扰

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)11-0007-03

电力系统自动化设备在保障电网稳定运行、提高供电质量及效率方面发挥着至关重要的作用。但这些自动化设备在复杂的电磁环境中运行, 面临着严峻的电磁兼容(EMC)挑战。而电磁兼容技术作为解决电磁干扰问题的关键手段, 已在全球范围内得到广泛研究和应用。随着电网规模的不断扩大和自动化设备的广泛应用, 电磁兼容问题日益凸显, 所以有必要进一步加强电磁兼容技术的研究, 以更好地提升电力系统自动化设备的运行水平。

1 电磁兼容技术概述

1.1 电磁兼容技术定义与原理

电磁兼容(EMC)技术是指确保电子设备或系统在复杂的电磁环境中既能正常运行又不会对其他设备产生不可接受的电磁干扰的一门学科^[1]。EMC主要包括电磁干扰(EMI)的抑制和电磁敏感性(EMS)的防护两大部分。EMI抑制技术通过使用屏蔽、滤波、接地和合理布线等方法, 减少设备产生的电磁辐射和传导干扰; 而EMS防护则是增强设备抵抗外部电磁干扰的能力, 确保其在遭受干扰时仍能稳定工作。

1.2 电磁兼容技术要素

电磁兼容技术要素涉及电磁干扰源、耦合路径和敏感设备, 这三个方面共同决定了电子设备或系统在电磁环境中的表现。

电磁干扰源是指产生不需要的电磁能量的设备或现象, 其能量会对其他电子设备造成干扰。干扰源可以分为自然干扰源和人为干扰源两大类。自然干扰源包括雷电、太阳活动等自然现象, 其产生的电磁脉冲或辐射会对电子设备造成干扰。人为干扰源则更多来自人类活动, 例如开关电源、电机、无线通信设备等。

其在运行过程中会产生电磁波, 如果未经适当处理, 就可能成为干扰源。

耦合路径是指电磁干扰从干扰源传递到敏感设备的途径, 可以是传导、辐射或两者兼有。传导耦合是指干扰信号通过导体(如电源线、信号线等)从干扰源传输到敏感设备^[2]。这种耦合方式常见于电源线和信号线, 尤其是当这些线路较长或未采取适当的滤波措施时, 更容易成为干扰的传播路径。辐射耦合则是指干扰信号以电磁波的形式在空间中传播, 最终被敏感设备接收。辐射耦合通常发生在高频干扰源附近, 因为高频信号更容易通过空间传播。除上述两种耦合方式外, 还存在共模和差模耦合。共模耦合是指干扰信号在所有导体上以相同相位和幅度出现, 而差模耦合则是指干扰信号在导体之间以相反相位出现。

敏感设备主要指那些对外部电磁干扰特别敏感的电子设备或系统。这些设备可能因为内部电路设计、工作频率或信号强度等因素, 对特定频率的电磁干扰特别敏感。例如, 医疗设备、通信设备、精密测量仪器等都属于敏感设备。一旦受到干扰, 这些设备可能会出现性能下降、数据错误或完全失效的情况。因此, 对敏感设备进行防护是EMC设计的重要环节。

2 电力系统自动化设备电磁兼容问题

2.1 自动化设备间的相互干扰

随着电力系统自动化程度的不断提高, 自动化设备在提高电力系统运行效率的同时, 其设备间的相互干扰现象日益凸显。自动化设备间的相互干扰主要有电磁波干扰和脉冲干扰两大类。电磁波干扰是自动化设备在工作时产生的电磁辐射对其他设备造成的影响。如变电站中的继电保护装置、自动化监控系统等设备,

在工作状态下会产生不同频率的电磁波，对邻近的通信线路和控制系统产生干扰。如在某些场合，电磁波强度达到 10 V/m 时，就足以对敏感设备产生不利影响。脉冲干扰则是指瞬间电压或电流突变对自动化设备造成的干扰。这种干扰一般来源于雷击、开关操作或电气设备故障等情况。如当开关设备在操作过程中产生的瞬态电压波形（如陡峭的上升沿）并通过电力线传播时，会在自动化设备的输入端产生瞬时过电压，从而影响设备的正常工作。

2.2 电源对系统的影响

电源是自动化设备的能量来源，其正常工作条件下也会对系统产生电磁干扰。如电源线上传输的电压波动和电流突变是常见的干扰源。研究显示，当电源电压波动幅度超过 $\pm 5\%$ 时，就可能对自动化设备的稳定运行产生不利影响^[3]。同时，在电网中存在大量开关电源和变频器的情况下，其会在电源线上产生大量高频噪声，且频率范围一般在几十千赫兹到几兆赫兹之间。此外，信号无序现象及信号互相干扰也是自动化设备中常见的电磁兼容问题。信号无序现象是由于信号线与电源线之间的耦合、信号线间的串扰以及外部电磁场的干扰所致。如信号线与电源线平行敷设时，两者之间的耦合效应就会导致信号线上的信号质量下降，特别是在距离超过 1 m 时，信号质量的下降更为明显。信号互相干扰则主要体现在不同信号线之间的串扰，尤其是当信号线间距小于 2 cm 时，串扰问题更为严重。

2.3 系统结构复杂性

电力系统结构的复杂性也是带来电磁兼容问题的主要因素之一。电力系统中的自动化设备往往包含大量电路和内部元件，形成了计算机控制下的复杂系统。比如典型的电力系统自动化设备就可能包含数百个集成电路、数十个处理器以及其他电子元件，而元件的紧密集成就使得设备内部的电磁环境非常复杂，各元件之间会产生电磁干扰。例如，两个电路板之间的距离小于 5 cm 时，信号线之间就可能出现明显的串扰现象，从而影响信号的完整性和稳定性。

3 电力系统自动化设备的电磁兼容技术与应用

3.1 滤波技术

滤波技术是一种有效的手段，广泛应用于电力系统自动化设备中，能够有效减少电磁干扰的影响。该技术在实际应用中需要重点把握好滤波器的设计以及电容、电感元件的应用两个要点。

高频噪声滤波器的设计意在针对特定频率范围内的噪声进行抑制。如电力系统因开关电源和变频器的

存在，会遇到频率在几十千赫兹到几兆赫兹之间的高频噪声。为了有效抑制这些噪声，滤波器的设计就需要全面考虑截止频率、阻抗匹配以及滤波器阶数三个参数。滤波器的截止频率决定了其对哪些频率范围内的信号进行过滤^[4]。如设计一个用于抑制 100 kHz 至 1 MHz 范围内的噪声的滤波器，其截止频率也应设置在这一范围内。而为确保滤波器与电源和负载之间的良好匹配，则需要仔细设计滤波器的输入和输出阻抗。通常情况下，滤波器的输入阻抗应与电源阻抗相匹配，而输出阻抗则应与负载阻抗相匹配。如在 $50\ \Omega$ 的标准系统中，滤波器的输入和输出阻抗也应该设计为 $50\ \Omega$ 。此外，滤波器的阶数决定了其频率响应曲线的斜率，阶数越高，对特定频率范围内的噪声的抑制能力越强。一般来说，二阶或三阶滤波器已经足够用于大多数应用。

电容和电感元件的应用主要涉及电容器与电感器两方面。电容器可以有效地旁路高频噪声。如一个 $1\ \mu\text{F}$ 的电容器可以有效地抑制频率高于 1 MHz 的噪声。在设计中，一般会在电源线上串联一个小电感（例如 $1\ \mu\text{H}$ ），再并联一个电容，形成LC滤波器，这样可以有效地抑制高频噪声。电感器则可以有效地阻止低频噪声通过。一个 $10\ \mu\text{H}$ 的电感器可以有效抑制频率低于 10 kHz 的噪声。在实际应用中，电感器通常串联在电源线上，以减少低频噪声的传导。

假设需要设计一个用于电力系统自动化设备的滤波器，以抑制 10 kHz 至 1 MHz 之间的噪声，就可以在电源线上串联一个 $10\ \mu\text{H}$ 的电感器，以阻止低频噪声的传导。随后再并联一个 $1\ \mu\text{F}$ 的电容器，以旁路高频噪声。此外，为确保良好的阻抗匹配，还可以选择 $50\ \Omega$ 的电感器和电容器，以匹配系统中的 $50\ \Omega$ 阻抗，如此就可以有效地减少电力系统自动化设备中的电磁干扰，提高设备的稳定性和可靠性。

3.2 地线技术

电力系统自动化设备的电磁兼容技术中，地线技术也是较为常用的技术之一。正确实施的地线技术能够有效地减少设备受到的电磁干扰，确保系统的稳定运行。常见的地线技术主要有单点接地、多点接地和混合接地。在多点接地中，星形接地的使用最为广泛。星形接地是通过将设备的各个地线汇集到一个公共接地汇流排上，再将这个汇流排连接到大地的一种接地方式。该方式能够有效减少地线之间的电位差，从而降低设备间的干扰。星形接地在实际应用中必须控制接地电阻在合理的范围内。根据相关标准，接地电阻一般要求在 $1\ \Omega$ 以下。如针对需要高度可靠性的自动化控制系统，其接地电阻应控制在 $0.5\ \Omega$ 以内，这样才能保证系统在遭受雷击或大电流冲击时仍能稳定运

行。同时，接地汇流排截面积直接影响到系统的接地效果，所以小型自动化设备接地时使用的汇流排截面积不应小于 50 mm^2 ，而大型系统则推荐使用截面积为 100 mm^2 以上的铜制汇流排，以确保良好的导电性能。接地线应尽可能短直，以减少地线的电感效应。针对关键的信号地线，一般建议使用直径至少为 2.5 mm 的铜线，并尽量减少转弯，以降低地线的电感，减少信号失真。此外，设备与汇流排之间的连接应采用螺栓紧固，以确保良好的电气连接。而根据设备的功率等级和重要性，螺栓的规格也有所不同。如小型设备可以使用 M6 或 M8 的螺栓，而大型设备则推荐使用 M10 或更大的螺栓。

3.3 设备布局与接线优化

设备布局与接线的优化也是一种重要的电磁兼容技术，其同样具有较强的技术性，因为科学的设备布局和接线不但能减少设备间的电磁干扰，还能提高系统的整体性能。对于设备布局的优化，首先需要最小化设备间的距离，即确保敏感设备与潜在干扰源之间的距离足够远。如针对高压设备和敏感的信号处理单元，它们之间的最小距离应至少保持在 1 m 以上。其次，应采取分区布置思路，将设备按照功能划分区域。例如将高功率设备与低功率设备分开，将模拟电路与数字电路分开，如此就可以有效地减少不同类型的设备之间的干扰。此外，模拟信号处理电路则应远离开关电源和高速数字电路，如此也可以避免电磁干扰。最后，对于需要特别保护的设备或区域，可以采用金属屏蔽盒或屏蔽柜进行物理隔离。不过在选择屏蔽材料时，其屏蔽效率至少应达到 20 dB ，如此可以减少 99% 的电磁干扰。

线路的优化关键在于如何有效隔离并控制干扰线路周边产生的电磁场干扰。这需要采取一定的措施来切断或显著降低干扰线路与其他电气线路之间的电磁耦合效应。首先应尽量避免干扰线路与其他线路以平行方式布置，因为这种布局极易加剧电磁干扰。若因实际条件限制必须保持平行布局，则必须严格遵守表 1 中规定的距离参数，以确保干扰水平控制在可接受范围内。

表 1 线路平行布局距离参数要求

导线间的间距 (mm)	敏感线和一般线路的间距 (mm)	电源馈线和信号线平行的间距 (mm)
< 40	> 50	> 50

此外，还需特别注意防止干扰线路的直接暴露，以减少外部因素对系统稳定性的潜在威胁。如针对在高频条件下易产生显著干扰的导线，必须使用金属屏

蔽层或电磁屏蔽材料等进行专门的屏蔽与隔离，如此可以有效遏制电磁辐射的扩散。

3.4 电磁兼容测试技术

电磁兼容测试主要包括电磁辐射测试和电磁抗扰度测试两大部分，用于评估设备产生的电磁辐射水平以及其对来自外界电磁干扰的抵抗能力。其中电磁辐射测试是为了评估设备在正常工作状态下对外界环境产生的电磁辐射水平，其能够确保设备发射的电磁辐射不会干扰其他电子设备的正常工作。根据国际电工委员会 (IEC) 的规定，电力系统自动化设备的电磁辐射水平应控制在一定的限值之下^[5]。如对于频率在 30 MHz 至 1 GHz 范围内的电磁辐射，设备的辐射水平不应超过 $20 \text{ dB } \mu\text{V/m}$ 。该测试技术的场地一般是在一个开阔的场地或屏蔽室内进行，使用的仪器主要有频谱分析仪和天线。在实际测试中，要按照规定的测试标准进行，如 IEC 61000-4-3，并将设备放置在指定位置，同时在多个方向上测量其辐射水平。

电磁抗扰度测试是为了评估设备对来自外界的电磁干扰的抵抗能力。这项测试需要在屏蔽室内进行，使用电磁干扰发生器来模拟不同频率和强度的电磁场。测试过程需要按照 IEC 61000-4-6 等规定的测试标准进行，同时将设备置于电磁干扰环境中来监测其性能变化。

4 结束语

电力系统自动化设备面临的电磁兼容问题是多方面的，为确保电力系统自动化设备的安全稳定运行，需要采取有效的电磁兼容技术，如滤波技术、地线技术、设备布局与接线优化以及电磁兼容测试技术等，同时还需要在实践中对相关技术的应用进行持续创新与优化，如此方能为电力系统的安全稳定运行提供更加坚实的技术支持。

参考文献:

- [1] 龙光清. 电磁兼容技术在电力系统自动化设备中的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S2): 38-40.
- [2] 张晓霞. 电力系统自动化设备的电磁兼容技术研究 [J]. 机电信息, 2019(35): 177-178.
- [3] 崔建军. 电力系统中的 PLC 抗电磁干扰技术研究 [J]. 通信电源技术, 2019, 36(06): 174-175.
- [4] 葛玉娜, 葛廷利, 王霞. 电磁兼容技术在电力系统自动化设备中应用的探讨 [J]. 现代制造技术与装备, 2018(11): 205-206.
- [5] 张志华, 彭志华. 关于电力系统自动化设备的电磁兼容技术研究 [J]. 南方农机, 2017, 48(23): 182-183.