 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11538

Analysis and Mitigation of Current Fluctuations in Synchronous Motors Caused by Starting Impacts of Asynchronous Motors

Xiaobing Wang Haiyang Li Fuqiang Zhang

China Petroleum Dushanzi Petrochemical Company, Dushanzi, Xinjiang, 833699, China

Abstract

In industrial power supply and distribution systems, asynchronous motors and synchronous motors often operate on the same grid. The reactive power surge caused by asynchronous motor startup can easily lead to abnormal operating parameters of the synchronous motor connected to the common busbar, posing risks to equipment performance and production safety. Through case comparison, theoretical analysis, and data validation, the root causes of these fluctuations and optimization measures were identified. providing practical references and technical support for stabilizing and optimizing motor systems in industrial shared grids.

Keywords

asynchronous motor; synchronous motor; current fluctuation; constant power factor control

异步电机启动冲击引发同步机电流波动的分析与抑制探讨

王晓兵 李海洋 张富强

中国石油独山子石化公司，中国 · 新疆 独山子 833699

摘 要

工业企业供配电系统中，异步电机与同步电机常共网运行，异步电机启动引发的无功冲击，易造成同母线同步机运行参数异常，威胁设备运行与生产安全[1]。本文以某化工企业老区供配电系统为研究对象，针对2024年6月1日3#2000kW异步电机启动时，同母线2#同步空压机定子电流大幅波动的异常现象，深入剖析异步电机启动冲击成因及同步机恒功率因数控制的电流波动机理。通过案例对比、理论分析与数据验证，明确波动根源与优化效果，结合同步机实际运行参数提出专项抑制措施，可为工业共网电机系统的稳定优化提供实践参考与技术支撑。

关键词

异步电机；同步机；电流波动；恒功率因数控制

1 引言

在石化、化工等大型工业生产中，6kV 高压母线承担着各类大功率电机的供电任务，其中异步电机因结构简单、运维便捷、成本低廉，广泛应用于风机、水泵、空压机等设备驱动；[2] 同步电机则凭借功率因数可调的优势，常用于对供电质量要求较高的负载，通过调节励磁电流实现无功功率补偿，维持电网功率因数稳定。然而，异步电机启动时会产生巨大启动电流和无功冲击，导致母线电压波动、无功失衡，进而引发同母线同步机定子电流、励磁电流异常波动，严重时可能导致同步机失步、跳闸，影响生产连续性 [3]。

某化工企业化工老区 6kV Ⅵ段母线承载多个重要生产负载，其中空压站 3# 机为 2000kW 高压异步电机，一空分 2# 空压机为 2800kW 高压同步电机（恒功率因数控制，初始 0.95 超前，后调至 0.98 超前，额定定子电流 312A、励磁电流 333A），两者共网供电。2024 年 6 月 1 日，3# 异步电机启动后 6 秒内，2# 同步机定子电流从 231A 骤增至 324A，波动近 100A；2025 年 6 月 24 日该电机再次启动，同步机电流波动降至 30A 左右。本文以这两次案例为核心，分析波动机理，验证优化效果，提出抑制措施，为工业共网电机稳定运行提供支撑。

【作者简介】王晓兵（1973–），男，中国甘肃人，本科，高级工程师，从事电气、励磁系统控制研究。

2 相关理论基础

2.1 异步电机启动特性

异步电机启动的核心特征是启动电流大、功率因数低，会对电网产生显著无功冲击。本次案例中 3# 机为 2000kW 高压异步电机，直接启动，额定电流 230A，启动电流峰值约 1610A（额定 7 倍），启动时间约 8 秒，启动时功率因数仅 0.3-0.5，主要吸收感性无功建立磁场，导致电网无功需求骤增、母线电压瞬时下降。待转子转速接近同步转速，启动电流逐渐降至额定值，功率因数提升至 0.8 左右，冲击减

弱。母线感性负载占比越高，启动引发的无功失衡和电压波动越明显。

2.2 同步机恒功率因数控制原理

同步电机可通过调节励磁电流灵活控制功率因数，恒功率因数控制通过励磁调节器监测电压电流相位差，对比实测与设定功率因数，自动调整励磁电流，实现电网无功动态补偿。

同步机功率因数与励磁电流密切相关：额定励磁时功率因数接近 1，无功电流最小；欠励时吸收感性无功，功率因数滞后；过励时发出感性无功，功率因数超前，相当于同步电容器。电网感性无功增加时，过励状态的同步机需增大励磁电流以补偿无功，进而导致定子电流增大，这是同步机电流波动的核心机理。

2.3 共网电机运行的相互影响

异步与同步电机共网运行时相互影响：异步电机启动、停机或负载突变会引发电网参数波动，影响同步机运行；同步机通过调节励磁补偿无功，维持电网稳定。异步电机启动产生无功冲击时，母线电压下降，恒功率因数控制的同步机需增大励磁电流补偿无功，若励磁响应不足，会导致定子电流波动。本次两次启动波动差异，正是功率因数调整导致励磁电流调整幅度不同的结果。

3 案例背景与波动现象

3.1 案例背景

该化工老区 6kV Ⅵ段母线额定电压 6kV、容量 10000kVA，正常功率因数 0.90-0.95，负载包括地膜厂 2# 线（1200kW 异步）、空压 2# 线（1800kW 异步）、顺丁 2# 线（1500kW 异步）、空分一 2# 线（2800kW 同步）、二循 2# 线（800kW 异步）、制氢 2# 线（1000kW 异步）、动力 2# 线（600kW 异步）。

空压站 3# 机为 2000kW 高压异步空压机，直接启动，额定电流 230A，启动电流峰值 1610A，启动时间 8 秒；2# 同步空压机为 2800kW，额定定子电流 312A、励磁电流 333A，恒功率因数控制（2022 年 0.95 超前，2024 年调至 0.98 超前），励磁调节范围 100-380A，用于母线无功补偿。该 3# 机两次启动（2024 年 6 月 1 日、2025 年 6 月 24 日）工况一致，仅同步机功率因数设定不同，波动幅度差异显著。

3.2 第一次波动情况描述（2024 年 6 月 1 日启动案例）

2024 年 6 月 1 日 20 点 12 分 16 秒，3# 异步电机启动，同母线 2# 同步机定子电流剧烈波动，具体如下：

① 2# 同步机波动持续时间 6 秒，与 3# 异步机启动时段重合，3# 机启动结束后，同步机定子电流恢复稳定。

②3# 异步机启动前同步机定子电流稳定在 231A 左右，启动后突增至 324A 左右，波动幅度近 100A，远超正常波动，波动趋势与 3# 异步机启动电流变化一致。

③相关参数：励磁电流从 333A 升至 380A 再降至 320A；母线电压从 6.05kV 降至 5.82kV；母线无功功率从 1800kvar 增大至 3200kvar。

④其他负载：母线其它异步电动机负载电流波动 10A 以内，未影响正常运行，说明 3# 异步机启动冲击引发波动，对同步机影响最大。

3.3 第二次波动情况描述（2025 年 6 月 24 日启动案例）

2025 年 6 月 24 日 11:29，3# 异步机再次启动，只对 2# 同步机功率因数由超前 0.95 调至超前 0.98，定子波动明显改善：

① 波动时间：仍为 6 秒，启动后同步机定子电流恢复明显加快。

②电流波动：启动前定子电流 231A，启动后定子电流波动最大 261A，波动幅度降至 30A，处于合理范围。

③联动参数：励磁电流波动（333A 至 353A），降幅 66.7%；母线电压降至 5.85kV（波动 3.3%）；母线无功功率增至 3000kvar（增幅 66.7%），同步机无功功率输出减少。

④通过对比分析：两次启动工况一致，仅同步机功率因数不同，说明功率因数调整是波动幅度下降的关键因素，验证了其抑制效果。

4 异步电机启动启动引发同步机电流波动的原因分析

4.1 异步电动机起动扰动成因及电网传导机理

3# 异步电动机采用全压直接起动方式，起动过程中产生的电网扰动集中体现为起动大电流与感性无功剧增两类问题，二者叠加作用于该段用电母线，进而对该母线同步电动机组运行状态造成干扰。

电机合闸起动初始阶段转子保持静止状态，对应转差率数值 s=1，转子绕组将感应出幅值极大的感应电流；为维持主磁场磁通恒定，定子侧绕组同步拉升输入电流，实测起动电流可达 1610A。大电流流经母线线缆会产生显著线路压降，直接造成母线电压跌落，现场实测数据显示：2024 年母线运行电压最低降至 5.82kV，2025 年最低母线电压为 5.85kV。

无功功率扰动：起动时功率因数 0.3-0.5，母线运行工况以吸收电网感性无功为主，2024 年起动无功消耗 1400kvar，2025 年无功消耗降至 1200kvar。该母线所带负荷除 2 号同步机组外，其余用电设备均为感性驱动设备，不具备无功自主补偿能力，系统无功缺额只能依靠 2 号同步机调整励磁电流进行平衡，这也是同步电动机定子电流出现周期性大幅波动的核心因素。

4.2 在恒功率因数控制下同步机定子电流波动的内在机理（结合两次案例对比）

2 号同步机恒功率因数控制，（2024 年 0.95 超前）/（2025 年 0.98 超前），正常运行时同步电动机为荣性负载。3# 异

步机启动引发母线无功功率陡然增大，同步机需调节励磁维持功率因数不变，就必须增大励磁电流，励磁电流增大时定子电流也增大，两次波动差异源于励磁调整幅度不同：

由同步机有功功率公式 $P=\sqrt{3}\ UI\cos\phi$，如果有功功率 P 稳定、功率因数 $\cos\phi$ 恒定时，定子电流 I 与电压 U 成反比。3# 异步机启动导致母线电压下降，同步机定子电流必须增大，这是两次波动的共同原因。

同步电动机励磁电流与功率因数存在直接耦合关系，机组处于过励工况时，超前功率因数数值越大，机组输出感性无功功率越少，励磁回路所需调节区间也随之收窄。以 2 号同步机组实际运行数据为例：2024 年机组设定超前功率因数 0.95，励磁电流由 333A 提升至 380A，同步定子电流最大波动区间接 100A；2025 年将超前功率因数上调至 0.98 后，励磁电流仅上升至 353A，定子电流波动区间回落至 30A，充分证明优化功率因数设定对平稳机组运行参数具备显著作用。

5 故障排查与对比核验

5.1 设备故障逐项排查与工况对照

2024 年同步定子电流出现大幅波动后，运维单位对 2 号同步电机开展全方位停机检修，依次检测定子绕组绝缘、整套励磁调节装置、二次控制回路等核心部件，各项检测指标均满足运行标准，可排除设备本体缺陷引发电流振荡的可能性 [2]。2025 年机组投运前再次完成全系统复检，设备整体工况完好，由此判定两年定子电流波动幅度差异，核心诱因仅为功率因数整定参数不同。

5.2 理论数值校核验证

2 号同步电机额定有功功率 2800kW，额定电压 6kV，额定定子电流 312A，额定励磁电流 333A；2024、2025 年机组分别采用 0.95、0.98 超前功率因数运行。机组启动瞬间母线最低电压分别为 5.82kV、5.85kV，运行实测有功功率稳定在 1900kW。

同步电动机有功功率：$P=\sqrt{3}\ UI\cos\phi$

推导出定子电流：$I=P/\sqrt{3}\ U\cos\phi$

① 2024 年：$I=1900*10^{3}/\sqrt{3}*5820*0.95\approx320A$, 与实测 324A 误差 1.2%，基本相同；

② 2025 年：$I=1900*10^{3}/\sqrt{3}*5850*0.98\approx305A$, 与实测 261A 误差 14.6%，定子电流未攀升至理论计算极值便快速趋于平稳，直观体现参数优化带来的运行改善效果 [4]。

通过理论计算完成定子电流波动现象机理佐证，明确电流振荡的形成逻辑，为功率因数优化调控方案提供理论支撑。

6 同步机电流波动的抑制优化方案

6.1 基础调控：调整恒功率因数设定值，减轻无功调节负荷

本次 2800kW 同步电机优化案例显示，超前功率因数由 0.95 上调至 0.98 后，定子电流波动幅值由 100A 下降至 30A，波动削减幅度达 69.4%。整定准则：在母线功率因数不低于 0.90 的运行条件下，将并网同步电动机组超前功率因数设定区间为 0.96~0.98，以此降低感性无功输出量，缩小励磁系统调节范围。同时引入电压反馈补偿，优先维持母线电压稳定，再兼顾功率因数，规避两类调控相互干扰。

6.2 异步电机起动方式优化，削弱投运冲击电流

针对站内 2000kW 3# 异步电机，建议取消直接起动模式，更换软起动装置，可将起动电流控制在额定 3-5 倍，除此之外，可错峰安排多台大功率异步设备启动操作，也可选用星三角降压、自耦变压器降压等传统限流起动方案。

6.3 励磁控制器参数整定与控制逻辑升级

优化励磁调节器比例系数 Kp 和积分系数 Ki，增大 Kp 提高响应速度，减小 Ki 避免积分饱和；检修升级励磁系统硬件，采用高精度传感器和优质整流模块，提升调节精度和可靠性 [5]。2025 年启动前优化励磁参数，配合功率因数调整，进一步降低了波动。

6.4 母线侧无功补偿装置扩容，扩充无功调节裕度

在 6kV Ⅵ段母线增设 2000kvar 静止无功补偿装置（电容器），安装在进线端，3# 机启动时快速补偿感性无功，减少同步机补偿压力。

7 优化措施落地效果对比分析

优先实施励磁参数优化和功率因数调整，并联电容器等措施后，效果显著：

①同步机定子电流波动有所缓解，仅调整功率因数和励磁参数，定子电流波动幅度从 100A 降至 30A，峰值从 324A 降至 261A，励磁电流波动降至 40A。

②启动扰动降低，3# 机启动后，启动电流降至 805A，母线电压波动降至 1.6%，无功增加量降至 700kvar，同步机定子电流波动进一步降至 16A。

③母线稳定性提升：增设电容器后，母线功率因数波动范围减小，电压稳定在 5.95-6.05kV，同步机补偿压力进一步减小。

④设备可靠性提高：优化后再次启动 3# 机时，同步机电流波动均小于 20A，无剧烈波动，避免了设备老化和跳闸，保障生产连续。

验证表明，各项措施科学有效，功率因数调整为核心简便措施，协同其他措施可彻底解决波动问题。

8 结论

本文以某化工企业两次实际起动案例为研究对象，经优化验证，得出以下结论：

① 异步电机启动时对启动电流和感性无功扰动，是同母线同步机电流波动的直接原因。2000kW 异步电机直接启动时，启动电流达额定值 7 倍，吸收大量感性无功，导致母线电压下降、无功功率突增，2024 年同步机电流波动近

100A。

②同步机恒功率因数控制下，过励状态励磁电流与定子电流正相关，母线无功骤增时，励磁电流增大导致定子电流波动，励磁响应延迟加剧波动；功率因数设定越高，波动越轻微。

③调整同步机恒功率因数是核心抑制措施，2800kW 同步机从 0.95 超前调至 0.98 超前后，电流波动降幅 69.4%，效果显著。

④母线异步负载占比高、大功率设备集中、负载波动频繁，会加剧波动；优化异步电机启动方式、励磁参数、母线无功补偿，可与功率因数调整协同作用，提升设备稳定性。

参考文献

[1] 王承煦, 张承瑞. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[2] 李建明, 王岩. 高压电机运行与维护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

[3] 张承瑞, 李娟. 异步电机启动冲击对电网的影响及抑制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 156-162.

[4] 刘军, 王浩. 同步机恒功率因数控制策略优化及应用[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 78-83.

[5] 黄守道, 李建湘. 同步电机励磁系统优化设计与应用[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2017.