

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200430

基于 DIgSILENT 的机网协调控制及动模验证

杨再欣, 陶 军, 尹柏清, 王蕴敏, 高 晨

(内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 具有联络断面弱、小网、大负荷特征的工业电网, 发生故障及断面解列时容易造成系统稳定性破坏问题, 为此提出 DIgSILENT 仿真平台用于源网荷储协调系统的暂态分析和控制器开发。提出了结合安全稳定控制系统、机网协调器、电力系统稳定器、励磁系统及调速系统于一体的工业电网数字孪生系统, 根据实测参数对自动装置的控制进行了建模和比对。基于 DSL 编程设计了机网协调控制器, 对电压控制、频率控制和功率控制整定参数, 验证了对频率电压稳定性的影响, 实现了联络断面功率的灵活调配。利用实时数字仿真器(RTDS)进行了机网协调装置和稳控装置的硬件闭环动模试验。给出了 DIgSILENT 仿真与 RTDS 仿真结果的对比, 验证了 DIgSILENT 仿真机网协调控制的准确性和有效性。

关键词: 机网协调; 安全稳定控制; DIgSILENT 仿真; 工业电网数字孪生; RTDS

Generator and power grid coordination control and dynamic test based on DIgSILENT

YANG Zaixin, TAO Jun, YIN Baiqing, WANG Yunmin, GAO Chen

(Inner Mongolia Power Research Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract: An industrial power grid with weak connection interface, small grid, and heavy load is prone to cause system stability damage after faults and splitting. For this reason, a DIgSILENT simulation platform is proposed for transient analysis and controller development of the generator-grid-load-storage coordination systems. An industrial grid digital twin system based on security and stability control, coordination control, PSS, AVR, governor and composite load is proposed. The controllers are modeled and compared by measured parameters. A generator and power grid coordination controller is designed based on the DSL programming, and parameters for voltage control, frequency control and power control are tuned. The influence on the frequency and voltage stability is verified, and the flexible configuration of the power of the contact section is realized. The controller can keep the voltage and frequency stable and realize flexible control of power. A Real Time Digital Simulator (RTDS) is used to carry out a closed-loop dynamic test for the generator and power grid coordination controller and security and stability controller. The simulation comparison results between DIgSILENT and RTDS is given. The correctness and effectiveness of the generator and power grid coordination control simulated by DIgSILENT are verified.

This work is supported by the 2021 Science and Technology Major Project of Inner Mongolia Autonomous Region of China (No. 2021ZD0026).

Key words: generator and power grid coordination; security and stability control; DIgSILENT simulation; industrial grid digital twin; RTDS

0 引言

区域电网系统互联、高比例新能源汇入、源网荷储协同运行、超高压交直流输电广泛互联, 使得大扰

动下系统发生稳定性破坏问题日益引起重视^[1-7], 近年来多起大停电事故往往与重负荷下电压、频率及功角失稳密切相关。随着我国高耗能工业企业发售电形式的变化, 生产负荷占比严重, 发电机的旋转备用容量不足, 同时例如石化类、电解铝类工业电网与外部大电网联络断面薄弱。

联络断面在解列为孤网时功率平衡被打破, 采

基金项目: 内蒙古自治区 2021 年度科技重大专项资助 (2021ZD0026)

取不当过切负荷易引发高频切机, 传统上对引发高频的控制集中在切机与发电机超速保护(OPC)的协调及优化配置^[8-9]。对故障冲击下频率和电压的控制包括耦合机理分析及动态特性研究^[10-11], 文献^[12-13]利用机理分析和数值仿真揭示电网频率特性进而调整功率平衡点, 缺少发电系统各类自动装置对模型参数的影响分析。切负荷作为低频减载的重要措施, 一直是过去十年来研究的热门方向, 从负荷特性、负荷-频率响应、负荷重要性、切除时间等方面建立了不同数学模型及控制策略^[14-17]。针对具有联络断面弱、小网、大负荷特征的工业电网, 上述研究没有综合考虑机组与联络断面之间的功率、电压、一次调频、二次调频及源网荷储的协调控制。随着区域安全稳定控制系统的多层级(纵向)和多层次(横向)深入^[18], 大型工业电网配置稳控系统成为趋势, 然而对机网协调控制器和稳控系统的建模及验证还未深入研究。

DIgSILENT 仿真软件与 BPA 相比, 结合了机电暂态和电磁暂态分析建模^[19], 拥有灵活自定义建模功能^[20-21]。考虑到机组的自动装置模型、参数对频率稳定性具有重要影响^[22-23], 本文分析了工业电网的负荷特征及安全稳定性, 基于数字孪生技术构建适用于动模测试的工业电网数字孪生系统, 设计机网协调控制器并整定电压环、频率环及功率环控制参数。利用 RTDS 具有连接外部硬件设备进行联合动模仿真的特点^[24-27]完成了对比性验证, 根据动模试验进一步验证 DIgSILENT 分析工业电网在机网协调控制设计及仿真方面的准确性及有效性。

1 工业电网数字孪生系统

1.1 工业电网特征分析

煤、石化、金属冶炼等工业电网低压母线所带负荷 70%~90%为马达电机, 其中具有平方转矩特性的电机如泵、风机占很大比例。因此, 根据工业电网实际参数建立包括恒阻抗、电机和无功补偿的综合负荷模型, 其电压和频率稳定性受电动机动态特性的影响。故障后综合负荷的母线残压特性曲线如图 1 所示。

故障后 1 s 内常规负载的残压由红色曲线表示。故障后 0.3 s 内的工业综合负荷残压由蓝色曲线表示。备用电源快速切换的临界电压曲线为 M-N。由于电机类负荷的惯性作用, 工业负荷的残压幅值下降较慢, 具有短时支撑作用, 而相角变化速度的加快, 使得快切装置在母联开关处同期合闸成功率下降, 因此工业电网应具备启动多级快切功能, 提高快切成功率。

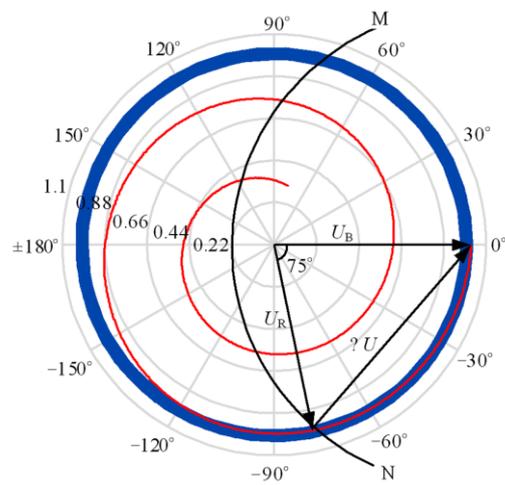


图 1 母线残压极坐标曲线

Fig. 1 Bus residual voltage polar curve

对于工业电网内部线路短路、变压器过载、工业负荷突然切除以及工业与外部大电网联络断面发生短路故障, 存在电力系统暂态稳定性问题, 机网之间的动态平衡被打破, 在经历暂态振荡后如果不能及时恢复稳定运行, 将造成大面积切负荷、发电机失步、解列等事故。根据功角稳定、电压稳定、频率稳定和热稳定分析^[28], 有多种方式能够提高暂态稳定性。利用安全稳定控制系统对故障实现快速切负荷的措施, 配合机网协调控制快速增减机组出力, 从而改变汽轮机输出机械功率, 增大系统可吸收能量面积, 提升暂态稳定裕度。对于联络断面较薄弱的工业电网, 当外电网发生故障造成短时孤网或低频逆功率运行时, 利用安稳系统快速切除故障, 配合机网协调控制的快速二次调频, 进而增加了减速面积, 系统可吸收能量增多, 提升暂态稳定性。

1.2 基于动模测试的工业电网数字孪生技术

数字孪生(digital twin)于 2002 年提出, 根据装置物理数据, 搭建能够表征该设备的数学模型, 将工程设计和数学模型进行比对, 更好地理解理论设计并指导实际生产, 最终加强对设备全生命周期有效管理^[29-30]。工业电网的数字孪生技术需要结合电力系统的精细化建模、先进测量及控保技术, 进行仿真分析决策, 构建以高性能数字仿真分析及实时动模测试技术为基础, 以多设备相互耦合的“信息-物理”交互为前提, 以设备的动态行为、决策及电网的安全稳定为目标的工业电网数字孪生系统, 如图 2 所示。

在物理层利用 RTDS 的高速计算能力和 GTIO 卡等高精度测量器件, 对继电保护、稳控装置、机网协调器等二次设备测试其控制保护性能; 在信息

层构建包括自动励磁调节器(AVR)、电力系统稳定器(PSS)、原动机及其调速系统(GOV)、一次系统及综合负荷的精细化工业电网模型,并利用 DIgSILENT 仿真分析及决策。

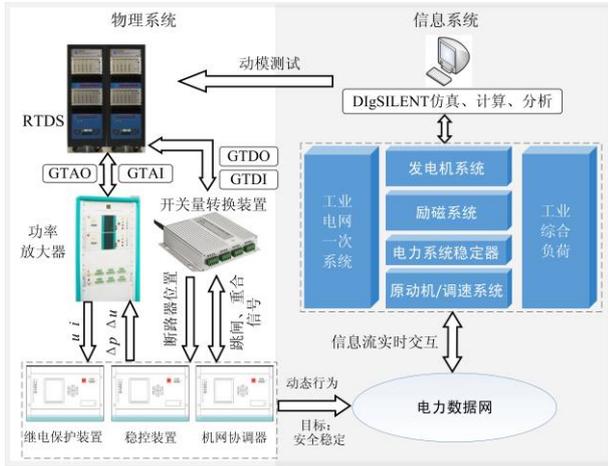


图 2 基于动模测试的工业电网数字孪生系统
Fig. 2 Digital twin system of industrial power grid based on dynamic test

1.3 DIgSILENT 自定义机网协调控制系统框架

本文设计的机网协调控制系统采用 DIgSILENT 自定义搭建动态模型,模型架构为自顶向下的“Model+Block”设计,电网调用机网协调控制系统模型,即通过数据库调用最顶层的复合模型 Composite Model,复合模型通过引用底层的由 Block Definition 构成的 Frame 实现功能调用。机网协调控制系统在电网侧主要为联络断面的电压、频率和功率的采集测量模块,在机组侧为同步发电机及各类控制器。基于 DIgSILENT 的机网协调控制系统自定义框架如图 3 所示。

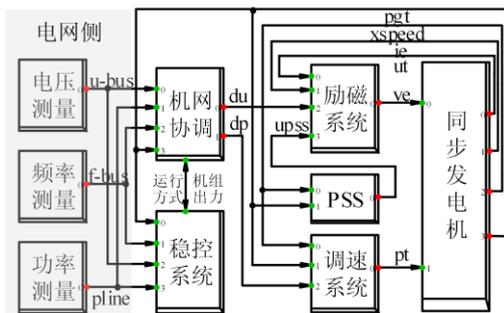


图 3 基于 DIgSILENT 的机网协调控制系统自定义框架
Fig. 3 User defined frame of generator and power grid coordination control system based on DIgSILENT

控制系统的模型框架通过 Solt 定义不同控制器和测量元件的内部结构进行数据传递。根据

DIgSILENT 的同步电机技术文档, Solt 的 IO 接口变量说明如下: pgt 为发电机电磁功率, xspeed 为发电机转速, ie 为励磁电流, ve 为励磁电压, ut 为发电机端电压, pt 为汽轮机机械功率, upss 为 PSS 输出电压, u-bus 为联络断面的母线电压, f-bus 为母线频率, pline 为联络线功率, du、dp 分别为机网协调控制器输出电压、输出功率。同时,机网协调控制器与稳控系统之间实时传输工业电网的运行方式(联网、孤网)及不同机组的可调出力量和um控目标功率值。

2 机网协调控制器设计

对于联络线薄弱的工业电网,机组运行存在孤网风险,因此机网协调控制器的设计主要有三方面功能:电压控制、频率控制和功率控制。DIgSILENT 中控制器的设计是基于编程语言(DIgSILENT Simulation Language, DSL)对 Block 进行定义,机网协调控制器模型如图 4 所示。

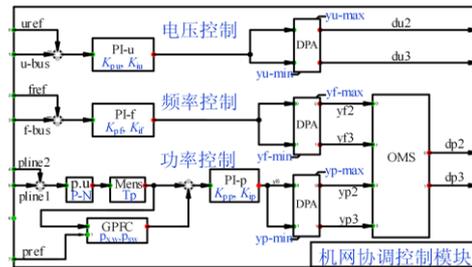


图 4 机网协调控制器模型

Fig. 4 Model of generator-grid coordination controller

2.1 电压控制

输入信号为联络断面电厂侧的母线电压,经过 PI 控制器,传递到动态功率分配器(DPA)。DPA 的功能是利用稳控系统提供的实时机组功率信息、联络断面潮流进行逻辑计算,根据向上可调出力量、向下可调出力量、一次调频最大负荷限制值、分区内无功电压优化设定值等参数,配合 AVC、AGC 控制,为不同机组生成动态增磁减磁量、频率调控制量、上调或下压机组出力。根据实测参数搭建的电网模型,模拟 220 kV 联络线路发生 N-2 故障,在 2 s 时刻突变为孤网运行,对参数整定计算,得到如图 5 所示母线电压曲线,电压环最优 PI 参数: K_{pu} 为 60, K_{iu} 为 5。

2.2 频率控制

输入信号为联络断面电厂侧的母线频率, DPA 的频率调控制量输出到系统运行方式选择器(OMS),根据稳控系统判出的运行方式:选择机组联网方式

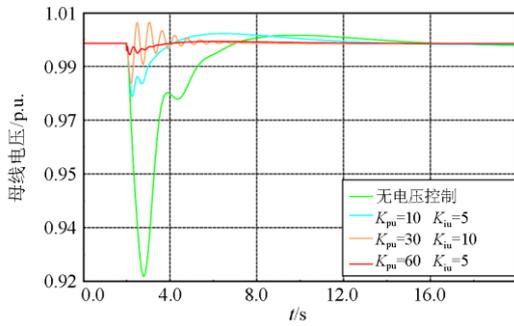


图 5 孤网时刻 220 kV 母线电压控制效果

Fig. 5 Control effect of 220 kV bus voltage at isolated grid

进行功率控制, 输出功率调节信号; 选择机组孤网运行方式进行频率控制, 输出频率调节信号。模拟电网工况为突变孤网运行, 在不投入机网协调控制的情况下, 故障前断面下网功率的大小影响孤网后母线频率稳定性, 断面功率越小, 孤网后频率下降越小, 稳定性越好。根据机组涉网保护规范, 汽轮发电机组连续运行的频率范围是 48.5~50.5 Hz^[31]。以母线频率稳定在 48.5 Hz 为边界条件, 断面下网功率与机组的旋转备用和额定功率有以下线性关系。

$$P_{XW} = a \sum_{i=1}^n (P_N - P) + b \sum_{i=1}^n P_N \quad (1)$$

式中: P_{XW} 为故障前断面下网功率; P_N 为额定功率; P 为故障前一周波额定功率; n 为运行机组台数。根据工业电网实测数据进行仿真线性拟合, 得出 $a=1, b=6\%$ 。投入机网协调频率控制后, 母线频率控制效果如图 6 所示, 频率环最优 PI 参数: K_{pf} 为 40, K_{if} 为 20。

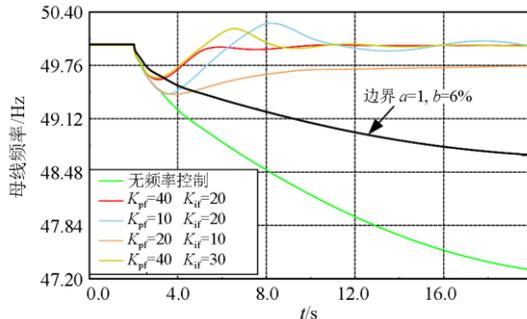


图 6 孤网时刻 220 kV 母线频率控制效果

Fig. 6 Control effect of 220 kV bus frequency at the moment of isolated grid

2.3 功率控制

输入信号为联络线路有功功率, 经过标幺值转换及延时处理后, 功率信号进入潮流控制器 (GPFC), 基于 DSL 编程的潮流控制器编程如图 7 所示, 图中说明 GPFC 的定义变量、初始化和嵌套

迭代计算能够根据上网越限定值、下网越限定值等设置, 实时灵活调配机组有功功率。

对功率环的 PI 参数进行整定, 模拟工业电网中生产线路跳闸, 厂用快切失败, 负荷损失 31.5 MW, 220 kV 联络线路功率由下网-17.4 MW 突变为上网 14.1 MW, 投入机网协调器, 上网功率越限定值为 7.5% P_N , 控制效果如图 8 所示, 功率环最优 PI 参数: K_{pp} 为 0.5, K_{ip} 为 1。

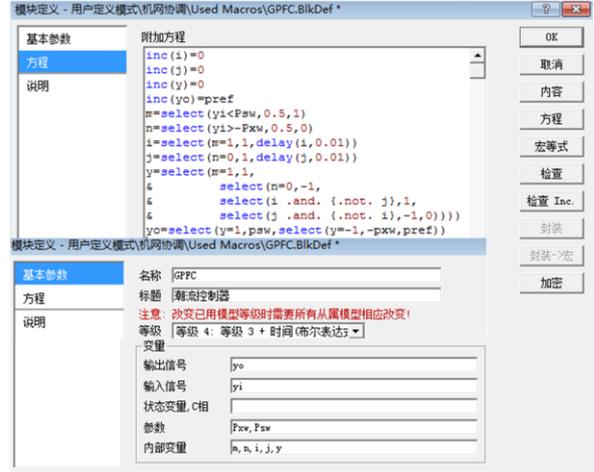


图 7 基于 DSL 编程的潮流控制器

Fig. 7 Block of GPFC based on DSL programming

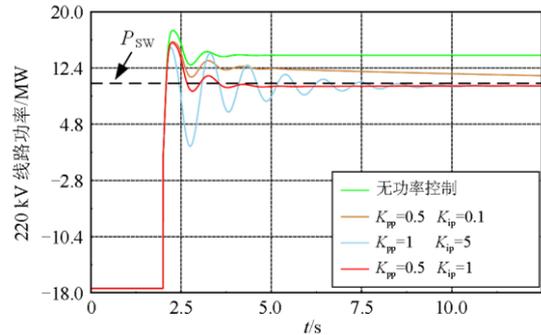


图 8 上网越限功率控制效果

Fig. 8 Control effect of line power on-grid limit

3 励磁、PSS 及调速系统的建模和对比

在 DIgSILENT 模型库中提供了基于 IEEE 的典型 AVR、PSS 和 GOV 模型, 模型和典型参数并不适用于每台机组, 影响暂态仿真结果的真实性和可靠性。根据相关控制器建模及试验导则, 电力试验单位需对发电机励磁系统、PSS 及调速系统进行参数测试及建模试验^[32], 因此有必要利用实测模型参数在 DIgSILENT 中进行建模仿真。

本文根据某工业电网的实测模型和参数, 在

DIgSILENT 搭建 FV 自并励静止励磁系统模型，励磁调节器 PID 传递函数如式(2)所示，在 DIgSILENT 中进行发电机空载 5% 电压阶跃响应，与 BPA 仿真比较结果如图 9(a)所示，两条阶跃响应曲线十分吻合，偏差在规程允许范围内。

PSS 模型搭建具有加速功率的 PSS2A 型，PSS 运行时增益整定为 5，转速环和功率环叠加作用后的传递函数如式(3)所示，PSS 投入和退出仿真结果如图 9(b)所示，投入 PSS 后为系统提供了正阻尼，功率振荡次数减少，抑制效果明显。

实测模型的调速器为电液伺服系统，根据一次调频试验结果，频差死区为 0.001 3 p.u.，自定义搭建 GJ+GA 型调速器，其中负荷控制模块 PID 传递函数如式(4)所示，电液转换模块 PID 传递函数如式(5)所示，汽轮机模型采用单杠无再热器的 TA 模型，蒸汽容积时间常数为 0.6，在机组负荷闭环方式下进行一次调频仿真试验，DIgSILENT 仿真结果与实测曲线对比如图 9(c)、图 9(d)所示。高压缸最大出力功率偏差在 30% 阶跃量范围内，功率的峰值时间偏差小于 0.2 s，调整时间偏差小于 2 s，满足相关标准要求。

$$G_{AVR}(s) = 45 + \frac{9}{s} \tag{2}$$

$$G_{PSS}(s) = 5 \frac{(1 + 0.18s)(1 + 0.3s)}{(1 + 0.02s)(1 + 0.03s)} \tag{3}$$

$$G_{GJ}(s) = 0.25 + \frac{0.11}{s} \tag{4}$$

$$G_{GA}(s) = 22 + \frac{0.5}{s} \tag{5}$$

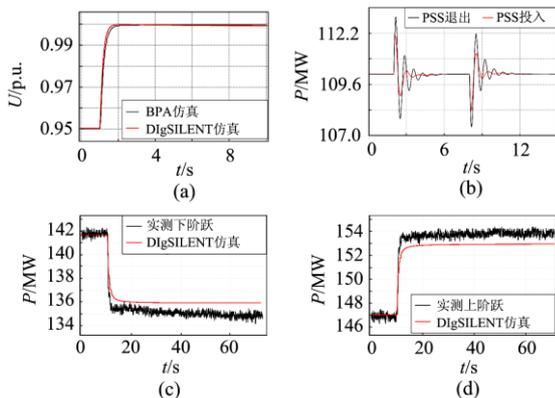


图 9 励磁系统、PSS 及调速系统的 DIgSILENT 仿真曲线
Fig. 9 DIgSILENT simulation curves of AVR, PSS and GOV

4 RTDS 动模试验验证

4.1 试验算例

在 RTDS 搭建石化工业局部电网模型，如图 10

所示，两台机组容量均为 168 MVA， P_N 为 135 MW。与外电网联络线路为两回 220 kV 线路，正常运行方式下，机组出力 210 MW 并需要外电网下网 40 MW 维持生产运行。220 kV、110 kV 及热电 110 kV 母线均并列运行，其余 110 kV 及以下系统分列运行。

外部电网根据系统潮流分配进行电源等值，保证动态特性一致。工业内部负荷站分为烯烃站、甲醇站及煤矿负荷站，采用综合负荷模型，其中感应电机占比约 70%，与实际工业电网负荷特性一致。机网协调控制器及稳控装置采用南瑞继保公司产品，控制器逻辑及参数与 DIgSILENT 建模设计一致。通过功率放大器及数字量转换装置将 RTDS 与稳控装置、机网协调控制器连接。

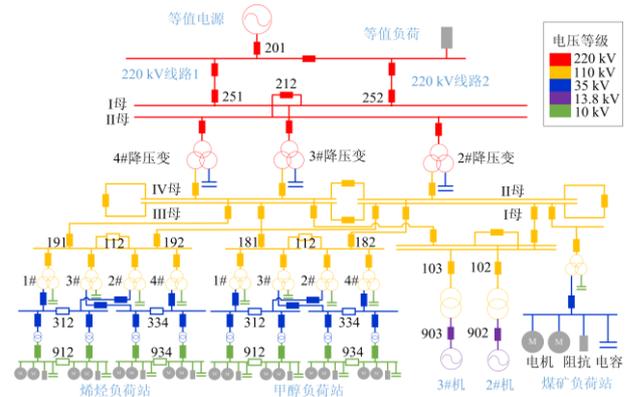


图 10 基于 RTDS 的工业电网试验模型

Fig. 10 Test model of industrial power grid based on RTDS

4.2 DIgSILENT 与 RTDS 仿真结果对比

根据动模试验规程^[33]，利用 RTDS 对装置的控制策略进行全面的功能性校验，包括：工业生产线路、母线故障验证快压机组功率控制；外电网故障验证孤网频率、电压控制；联络断面潮流越限验证稳控和机网协调配合；降压变过负荷验证稳控和机组功率协调配合等。

为了验证基于 DIgSILENT 仿真设计的机网协调器及控制参数的准确性和有效性，本文以工业电网联络断面 N-2 故障触发孤网控制为例，进行 DIgSILENT 仿真与 RTDS 仿真比对。

试验工况事故前联络断面下网 57 MW，2 台机组有功功率分别为 115 MW 和 113 MW，稳控策略的低频变化量阈值设为 0.1 Hz 且确认延时为 100 ms，切负荷低频阈值为 49.9 Hz，采取欠切原则并考虑机组调峰能力。联网转孤网的仿真结果对比如图 11 所示，分别展示了 220 kV 母线频率、母线电压及 2 号发电机有功功率的故障录波。

在 1.00 s 双回 220 kV 线路跳闸，220 kV 母线

电压在 1.005 s 出现电压峰值, DIgSILENT 与 RTDS 的暂态过电压波形结果一致。由于机网协调控制器转为孤网运行模式, 在频率-电压环的作用下, 母线频率在 1.08 s 达到最小值, 二者仿真结果频率的差值为 0.03 Hz。稳控装置在 1.16 s 执行低频切负荷 48 MW, 因此机组需向上调节 9 MW, 按照两台机可调整有功功率比例分配得出 2 号机需增加 4 MW, DIgSILENT 与 RTDS 的功率曲线在 2.7 s 稳定出力 119 MW。母线频率在 5 s 恢复 49.99 Hz 并维持孤网稳定运行。

根据 DIgSILENT 仿真试验及 RTDS 动模验证, 表明基于 DIgSILENT 机网协调控制系统的设计和仿真具有准确性和有效性, 对研究工业电网机网协调特性具有重要意义, DIgSILENT 仿真参数设计及性能调节能够指导生产, 有效解决孤网稳定性问题。

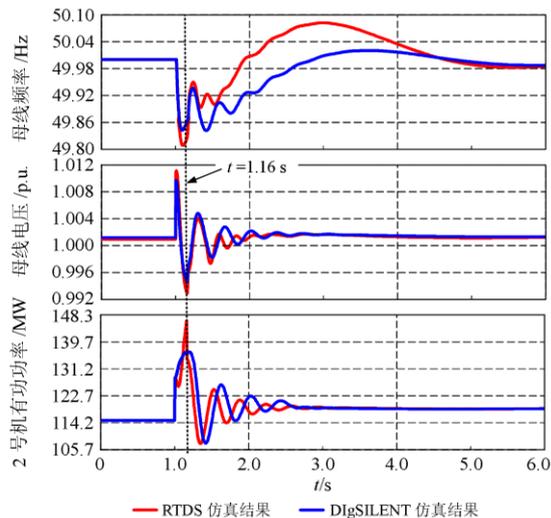


图 11 DIgSILENT 与 RTDS 仿真结果比对

Fig. 11 Simulation comparison results between DIgSILENT and RTDS

5 结论

本文针对工业电网的联络断面弱、小网、大负荷特征, 从暂态稳定性分析方面, 利用 DIgSILENT 仿真分析软件全过程暂态仿真和灵活的自定义建模的优势, 设计了一套基于的机网协调控制系统, 主要结论有以下几点。

1) 分析了工业电网的负荷特征及安全稳定性, 基于数字孪生技术构建了适用于动模测试的工业电网数字孪生系统。

2) 提出结合稳控、机网协调、励磁、PSS 和调速系统于一体的 DIgSILENT 模型架构, 可广泛适用于发电机控制系统建模。

3) 基于 DSL 编程语言设计了机网协调控制器, 对电压控制、频率控制和功率控制进行了参数整定。

4) 根据实测参数搭建了励磁系统模型并与 BPA 进行对比验证, 建立的 PSS 模型对低频振荡有较好的抑制作用, 调速器及汽轮机模型的一次调频仿真与实测曲线满足偏差允许值。

5) 利用 RTDS 测试系统搭建了电网、负荷及机组模型, 同时接入机网协调控制器和稳控装置进行动模试验, 以工业电网发生孤网试验为例, 验证了机网协调控制器和安稳系统功能, 对比了 DIgSILENT 与 RTDS 仿真结果, 表明设计的机网协调控制能够避免系统失稳造成的严重后果, 可以较好地支撑工业电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] 王超, 张红丽, 刘福锁, 等. 新能源集群送出交直流系统多稳定问题演化机理及防控措施[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 77-84.
WANG Chao, ZHANG Hongli, LIU Fusuo, et al. Evolution mechanism of multiple stability problems and control strategies of AC/DC power system with large-scale wind turbine generators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 77-84.
- [2] 郝雨辰, 江叶峰, 仇晨光, 等. 基于多代理系统的直流微电网分区式稳定控制方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 15-20.
HAO Yuchen, JIANG Yefeng, QIU Chenguang, et al. Research on sub-regional stability control of DC microgrid based on multi-agent system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 15-20.
- [3] 孙鹏伟, 张野, 张帆, 等. 光伏电站进孤岛后系统稳定性风险量化评估[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 87-91.
SUN Pengwei, ZHANG Ye, ZHANG Fan, et al. System stability risk quantitative analysis after PV plants drop into island operation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 87-91.
- [4] 时伯年, 孙刚, 瞿艳霞. 柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 137-142.
SHI Bonian, SUN Gang, QU Yanxia. Research on coordinated frequency stability control after islanding based on VSC-HVDC technique[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 137-142.
- [5] 杨丹, 党杰, 邱威, 等. 祁韶特高压直流投运后湖南电网电压稳定问题[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 163-170.
YANG Dan, DANG Jie, QIU Wei, et al. Study on voltage stability of Hunan power grid integrated with Qi-Shao

- UHVDC transmission line[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(6): 163-170.
- [6] 张舒捷, 方保民, 陈春萌. 750 kV 串补投产后对青海电网安全稳定性的影响[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(5): 8-16.
ZHANG Shujie, FANG Baomin, CHEN Chunmeng. Impacts of the 750 kV series compensation on the safety and stability of qinghai power grid[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(5): 8-16.
- [7] 于家英, 韩民晓, 曹昕, 等. 基于功率同步机制锁相的光伏并网系统稳定性分析[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(12): 59-66.
YU Jiaying, HAN Minxiao, CAO Xin, et al. Stability Analysis of photovoltaic grid-connected system based on power synchronization mechanism phase-locked[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(12): 59-66.
- [8] 侯玉强, 李威, 郑惠萍, 等. 解列后局部电网的自适应第三道防线配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 176-181.
HOU Yuqiang, LI Wei, ZHENG Huiping, et al. Third defense line configuration method adaptable to isolated local power grid after splitting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 176-181.
- [9] 王一振, 马世英, 王青, 等. 电力系统孤网高频问题研究现状和发展趋势[J]. *电网技术*, 2012, 36(12): 165-169.
WANG Yizhen, MA Shiyang, WANG Qing, et al. Present status and developing trend of research on over frequency in isolated power grid[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(12): 165-169.
- [10] 吕思卓, 郑超, 彭利, 等. 孤岛电网频率电压耦合机理及控制措施[J]. *中国电力*, 2018, 51(11): 53-60.
LÜ Sizhuo, ZHENG Chao, PENG Li, et al. Coupling mechanism and control measures of dynamic frequency and voltage in isolated power grid[J]. *Electric Power*, 2018, 51(11): 53-60.
- [11] 许胜, 曹武, 赵剑锋. 微网稳定运行与模式平滑切换综合控制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(16): 3855-3867.
XU Sheng, CAO Wu, ZHAO Jianfeng. An integrated control strategy of the stabilization operation and mode smooth transfer for microgrids[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(16): 3855-3867.
- [12] 周海峰, 倪腊琴, 徐泰山. 电力系统功率频率动态特性研究[J]. *电网技术*, 2009, 33(16): 58-62.
ZHOU Haifeng, NI Laqin, XU Taishan. Study on power-frequency dynamic characteristic of power grid[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(16): 58-62.
- [13] 张刘杰, 肖仕武, 黄松柏. 基于灵敏度的孤网动态频率偏移峰值分析和调速系统参数优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(2): 137-143.
ZHANG Liujie, XIAO Shiwu, HUANG Songbai. Dynamic frequency offset peak analysis and speed control system parameter optimization of isolated networks based on sensitivity[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(2): 137-143.
- [14] 蔡国伟, 孙正龙, 王雨薇, 等. 基于改进频率响应模型的低频减载方案优化[J]. *电网技术*, 2013, 37(11): 3131-3136.
CAI Guowei, SUN Zhenglong, WANG Yuwei, et al. Optimization of under frequency load shedding scheme based on improved system frequency response model[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(11): 3131-3136.
- [15] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [16] 王玉, 许和平, 王怀明, 等. 电解铝重载孤网紧急控制优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(21): 121-126.
WANG Yu, XU Heping, WANG Huaiming, et al. Emergency control optimization measures for isolated power grid with heavy load of electrolytic aluminum[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(21): 121-126.
- [17] 赵丹, 满基, 倪云玲, 等. 基于 RTDS 仿真的自适应低压减载策略研究[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(1): 61-68.
ZHAO Dan, MAN Ji, NI Yunling, et al. Research on the strategy of adaptive UVLS based on RTDS simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(1): 61-68.
- [18] 彭云豪, 董希建, 周海强, 等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(13): 123-131.
PENG Yunhao, DONG Xijian, ZHOU Haiqiang, et al. Reliability evaluation of power grid security and stability control system[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(13): 123-131.
- [19] 董炜, 潘秋萍, 雷金勇, 等. BPA 与 DIgSILENT 动态模型比较与数据转换[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(8): 140-146.
DONG Wei, PAN Qiuping, LEI Jinyong, et al. Comparison and data conversion between dynamic models of BPA and DIgSILENT[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(8): 140-146.
- [20] 张君宇, 林睿, 陶维青. 基于 DIgSILENT 的继电保护建模仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11):

- 62-67.
- ZHANG Junyu, LIN Rui, TAO Weiqing. Study of relay protection modeling and simulation on the basis of DIgSILENT[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 62-67.
- [21] 张明, 瑞志超, 黎娜, 等. 高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 20-26.
- ZHANG Ming, RUI Zhichao, LI Na, et al. Control strategies of frequency stability for islanding high-voltage microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 20-26.
- [22] 海世芳, 孙士云, 范小红, 等. 计及频率特性的感应电动机参数变化对负荷特性的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 17-25.
- HAI Shifang, SUN Shiyun, FAN Xiaohong, et al. Influence of induction motor parameter change considering frequency characteristics on load characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 17-25.
- [23] CHEN L, LU X M, MIN Y, et al. Optimization of governor parameters to prevent frequency oscillations in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4466-4474.
- [24] BARACHO F R, PEREIR FILHO C S, COELHO A L, et al. A theoretical and practical approach for underexcitation protection and control studies of hydrogenerators in a real-time environment[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(4): 3132-3144.
- [25] XU J, LIAO S, SUN Y, et al. An isolated industrial power system driven by wind-coal power for aluminum productions: a case study of frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 30(1): 471-483.
- [26] 欧开健, 张树卿, 童陆园, 等. 基于并行计算机/RTDS的混合实时仿真不对称故障接口交互与实现[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(2): 178-185.
- OU Kaijian, ZHANG Shuqing, TONG Luyuan, et al. Interface method and implementation for asymmetric fault simulation on parallel computer/RTDS based hybrid simulator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(2): 178-185.
- [27] YANG Z, WANG Y, XING L, et al. Relay protection simulation and testing of online setting value modification based on RTDS[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(1): 4693-4699.
- [28] 国家能源局. 电力系统安全稳定导则: GB/T 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- National Energy Administration. Code on security and stability for power system: GB/T 38755—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [29] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(3): 385-392.
- LI Xin, LIU Xiu, WAN Xinxin. Overview of digital twins application and safe development[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(3): 385-392.
- [30] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 1-13.
- SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 1-13.
- [31] 中国电力企业联合会. 大型发电机组涉网保护技术规范: DL/T 1309—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- China Electricity Council. Technical specification for grid-related protection of large generating unit: DL/T 1309—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [32] 中国电力企业联合会. 电力系统网源协调技术规范: DL/T 1870—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- China Electricity Council. Technical specification for power grid and source coordination: DL/T 1870—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [33] 中国电力企业联合会. 电力系统继电保护产品动模试验: GB/T 26864—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- China Electricity Council. The dynamic test of the power system protective products: GB/T 26864—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-06-22

作者简介:

杨再欣(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统控制保护、仿真分析。E-mail: zaixin.yang@foxmail.com

(编辑 葛艳娜)