

多源电力系统电磁兼容性能测试方法优化设计

陈瑞, 冷迪, 李英

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 在多源电力系统的应用环境下, 电磁兼容特征直接决定应用效果。需要对这一性能精准测试, 相关测试方法存在输出稳定性和测试精度不高的问题, 故针对多源电力系统提出一种优化的电磁兼容性能自动测试方法。设计多源电力系统下测试方法的逻辑, 通过设计参数, 完成信号分析模型的构建。分析并确认电磁场中信号的稳态检测参数、兼容性检测输出电流、融合电流等参数。运用电磁信号调制信息分析方法, 得到等效参数识别模型, 设计稳态测量方程。利用前述参数对所提方法进行优化, 根据模型完成性能测试。实验结果表明: 所提方法在多源电力系统上应用的过程中, 电磁兼容性测试的准确性较高, 输出稳定性较好, 具有一定的实际应用意义。

关键词: 电磁兼容性; 测试; 电磁信号分析; 模型

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)03-0119-04

Optimization Design of EMC Performance Test Method for Multi-source Power System

CHEN Rui, LENG Di, LI Ying

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000 China)

Abstract: In the application environment of multi-source power system, EMC characteristics directly determine the application effect. This performance needs to be tested accurately, and the relevant test methods have the problems of low output stability and test accuracy. Therefore, this paper proposes an optimized automatic EMC performance test method for multi-source power systems. It designs the logic of the test method under the multi-source power system, and completes the construction of the signal analysis model through the design parameters. It analyzes and confirms the steady state detection parameters, compatibility detection output current, fusion current and other parameters of the signal in the electromagnetic field. The equivalent parameter identification model is obtained by using the electromagnetic signal modulation information analysis method, and the steady-state measurement equation is designed. It also uses the above parameters to optimize the proposed method, and completes the performance test according to the model. The experimental results show that the proposed method has high accuracy and good output stability in the application of multi-source power system, and has certain practical significance.

Keywords: electromagnetic compatibility; test; electromagnetic signal analysis; model

0 引言

随着电力设备智能化的不断发展, 在一些大型智能电网中, 对多源电力系统应用中的电磁兼容性测试提出了更高的要求^[1], 电磁兼容性是制约硬件系统稳定性的关键要素, 对于其测试方法的研究也受到了人们的极大关注^[2]。

传统方法中, 对电磁兼容性能自动测试的方法主要有: 基于电磁耦合控制的测试方法, 基于模糊度功率因素分析的测试方法等。主要都是通过构建约束对象和控制对象模型, 对模糊参数和电磁场特征进行分析, 实现的兼容性自动测试^[3]。但以上方法在实际应用过程中, 其测试的输出稳定性较差, 测试精度也不高。

为解决上述问题, 本文提出一种适用于多源电力系

统的电磁兼容性能自动测试优化方法, 并进行应用测试分析, 以展示本方法在测试能力方面的优越性能。

1 方法设计与优化

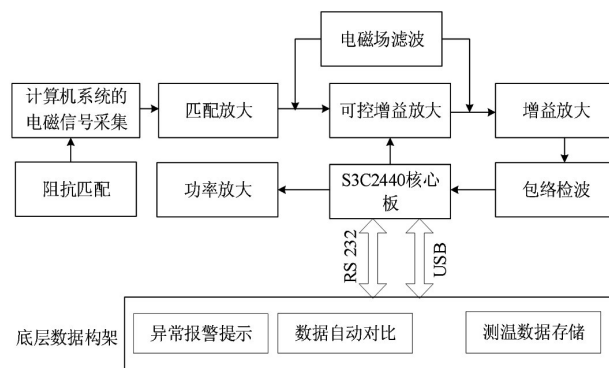


图1 设计方法的总体逻辑结构

通过空间谱密度分析方法,构建电磁扰动分析模型,得到的设计方法的总体逻辑结构如图1所示。

1.1 电磁信号分析模型的构建

为了构建信号分析模型,需要完成电磁兼容性的信号拟合和参数估计,分析电磁信号的自相关约束参数^[4],根据图1所示的总体逻辑结构,结合电磁信号的特征,进行数据驱动模型参数设计^[5],得到兼容性特征分布的驱动参数结构模型如式(1)所示:

$$J = f \times p(a_i) + k, \quad (1)$$

式中, f 为特征系数, $0 \leq K_r \leq 1 (i=0, 1, 2, \dots, m)$ 且 $p(a_i)=1$,表示电磁耦合及漏感参数,建立电磁耦合控制的约束参数模型,采用非平稳时变信号特征检测的方法,进行电磁信号传输^[6],根据模糊参数耦合控制方法,实现电磁场输出平衡度分析,得到电磁场兼容性分布的梯度模型,如式(2)所示:

$$G = \frac{Kr}{V} d_r + \frac{J}{V} d_r \quad (2)$$

式中, V 为电磁场输出平衡度,电磁信号输出的受控源特征分布如式(3)所示:

$$H(t) = \frac{G}{V} + \frac{1}{2\pi} S(f) d_r f \quad (3)$$

式中, $S(f)$ 为电磁信号输出的受控源特征函数,计算出各个不同时刻的功率谱,在区间 $[-T, T]$ 上,得到电磁兼容性联合测量参数模型如式(4)所示:

$$P_u = \cos\{H(t)\} = \frac{N_I}{V} + \frac{N_R}{V} + \frac{N_S}{V} \quad (4)$$

式中, N_I 、 N_R 和 N_S 分别表示约束对象参数。由此构建电磁信号分析模型。

1.2 电磁兼容性能参数分析

构建完联合测量参数模型后,需要对相关电磁场中信号的稳态检测参数、电磁兼容性检测输出电流、融合电流等参数分析和确认^[7]。首先,构建电磁场的输出功率衰减特征检测模型,通过电磁场输出波束聚集性分析,电磁场的融合关系 L ,构建电磁信号的检测模型,得到信号稳态检测的参数如式(5)所示:

$$P_\omega = L \times \left[\frac{(u_i - u)(u_i - u)^T}{V} \right] \quad (5)$$

式中, u_i 为信号的稳态检测量, u 为信号的稳态驱动量^[8]。基于模糊度检测方法,在复杂环境下,电磁信号的窗函数 $h(t)$ 的宽度为 $T=f/2$,扰动控制参数如式(6)所示:

$$K_i = P_\omega + W_i = 0, 1, \dots, 15 \quad (6)$$

式中, W_i 为电磁扰动参数,采用电磁衰减参数辨识方法,构建模糊度识别模型,得到输出电流参数如式(7)所示:

$$i_c = K_i \times \sin(u_i - u) \quad (7)$$

再次,采用频率分量特征分解方法进行电磁信号的

特征检测,进行电流输出稳定性分析^[9],得到输出稳态特征量参数应满足如式(8)所示的条件:

$$I(k) = \begin{cases} i(k), i(k) > 1 \\ i_c - i(k), i(k) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $i(k)$ 为稳态电流,构建参数辨识模型,如式(9)所示:

$$\min(Kr) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(k) + P_\omega \quad (9)$$

式中, P_ω 表示额定的输出稳态电流分量,引入功率增益调节,实现对参数融合^[10],得到输出融合电流参数如式(10)所示:

$$i_k = \sum_{n=0}^{N-1} 2F_m \left(K_n g \cos \frac{2\pi}{N} - b_n \sin \frac{2\pi}{N} \right) \quad (10)$$

式中, $k=0, 1, \dots, N-1$, F_m 表示电磁转矩的输出指向性幅值, b_n 为电磁场输出的调制分量,最后,根据功率增益调节,完成电磁兼容参数分析。

1.3 稳态测量方程设计

确认等效参数后,需要运用电磁信号调制信息分析方法,得到等效参数识别模型^[11]。根据电磁兼容性的节点分布,假定非平稳信号在分析窗函数 $g(t)$,电磁信号调制参数量化集为 $H(u, v) \in P$,采用自相关检测方法,进行电磁输出稳定性分析^[12],得到稳态测量方程如式(11)所示:

$$G(t) = g(t) \times P_1 + \sum_{i=1}^n V \times P_2 + P_3 \quad (11)$$

式中, P_1 、 P_2 和 P_3 为电磁场特征检测的模糊识别参数, $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ 。基于模糊更新和信息融合方法,得到电磁兼容性检测的自适应迭代式如式(12)所示:

$$\begin{cases} K_{id}^{(t+1)} = K_1 + H_1 + \int_{-\infty}^{\infty} G(t) e^{-2\pi t} dt \\ K_{id}^{(t+1)} = K_2 + H_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\{K_1, K_2\}$ 为电磁耦合状态参数, $\{H_1, H_2\}$ 为 $\{0, 1\}$ 间的电磁场分布的特征量^[13]。

1.4 方法优化设计

通过得到测试模型及相关方程后,可计算电磁兼容性能参数,对电磁兼容性测试的方法优化:

采集电磁信号的特征点并进行射频标签识别^[14],在复杂电磁信号扰动下,得到指向性特征如式(13)所示:

$$X(t) = \min(Kr) + I_C \quad (13)$$

基于AR模型参数识别的方法,构建电磁信号参数估计模型,多空间参数识别过程如式(14)所示:

$$\begin{cases} H(t) = -2m(t) \cos(\theta(t)) \\ K(t) = m^2(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, m 为电磁信号参数,对电磁信号波束进行处理^[15],构建电磁场的输出功率衰减特征检测模型,通过电磁场输出波束进行聚集性分析,得到匹配滤波参数如式(15)所示:

$$H(z) = X(t) \frac{1 + 2K(t)}{1 - H(t)} \quad (15)$$

根据上文提取到的电磁信号的谱特征量,由谱分量分布^[16],得到电磁损耗衰减因素如式(16)所示:

$$x(n) = A \cos 0.3\pi + \int_{-\infty}^{\infty} H(z) dz \quad (16)$$

对电磁信号进行模糊调制,使其在相位 φ 处的模糊度函数满足 $[-\pi, \pi]$ ^[17],结合空间采样技术,由 $x = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ 得到的电磁信号检波输出,如式(17)所示:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{x(n)}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} x^2\right), & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (17)$$

当 $\sigma^2=1$ 时,电磁信号检测的频谱特征的包络和方差如式(18)、式(19)所示:

$$E(x) = \sqrt{\frac{\pi\sigma^2}{2}} \quad (18)$$

$$\text{var}(x) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2 \quad (19)$$

结合电磁信号检测和滤波分析方法,实现对于电磁兼容性能的测试,实现流程如图2所示。

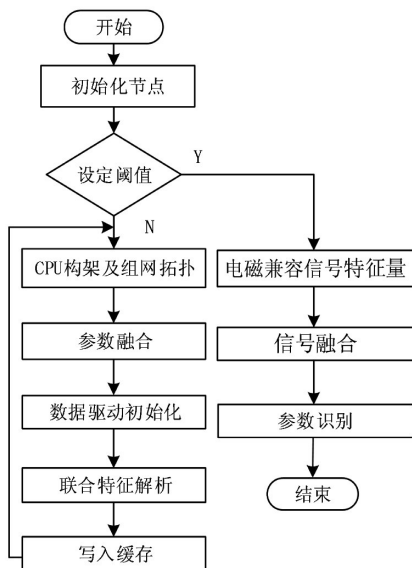


图2 电磁兼容性测试的实现流程

2 应用测试与分析

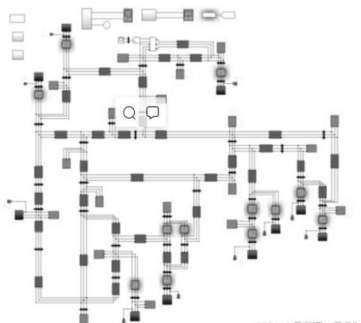


图3 多源电力系统仿真图

通过仿真测试,验证本文方法在多源电力系统中,对电磁兼容性进行测试的应用性能。多源电力系统仿真图组成:十机39节点系统共有10台发电机,39个节点,共46条支路,其中5条为联络开关支路、1个电源作为平衡节点。从拓扑图中可以看出,0至17节点作为干线,由干线分别从1、2、5节点引出分支。并进行各元件(发电机、变压器、线路和负荷)的参数设置,以便运行该模型。

设定多源电力系统电磁信号检测的时间长度为1 024,电磁场的耦合系数为0.83,输出功角为23.9 rad,功率因素为0.214,检测样本数为250个,其他相关参数如表1所示。

表1 参数设定表

参数	取值	参数	取值
暂态稳定特征值	2.15	励磁电流	21 mA
磁密	1.24	CPU的负载	21 W
功率因素泊松比	0.46	磁场衰减系数	0.215
开关频率	340 Hz	驱动系数w	1.01

根据表1中的参数设定进行应用测试,得到电磁场的输出激励检测结果如图4所示。

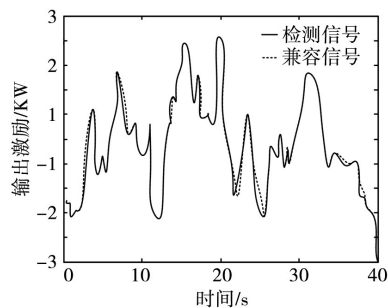


图4 电磁场的输出激励检测结果

分析图4得知,本文方法检测到的信号与实际的兼容信号高度相符,说明该方法能有效实现对多源电力系统电磁场的输出激励检测和信号特征分析,并以此实现兼容性测试,输出结果如图5所示。

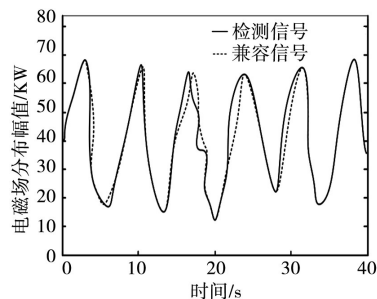


图5 系统电磁兼容性测试结果

分析图5得知,本文方法在多源电力系统中进行电磁兼容性检测的输出稳定性较好,有效提高了测试过程的稳定性。

以文献[3]方法和文献[4]方法为对比方法,测试三种

(下转第136页)