符合商业用核能发电炉相关的新管制基准的耐震配电柜

Seismic-Resistant Switchboards Conforming to New Regulatory Standards Concerning Commercial Nuclear Reactors

今野　雅行 KONNO, Masayuki　　藤本　义雄 FUJIMOTO, Yoshio　　长泽　武则 NAGASAWA, Takenori

以核电站为代表的核能相关设施，要求装置具备与其重要程度相应的耐震性。东日本大地震以后，相关部门对核能管制基准进行了修改，要求装置具有更高的耐震性。为此，富士电机开发了符合新管制基准且具有高刚性的耐震配电柜。经过用于评价刚性的固有振动频率分析，确认带可动部动态装置的功能维持情况的振动试验后，可以预测固有振动频率能够达到 30 Hz 以上这一目标。

Nuclear power plants and other nuclear-related facilities are required to have a certain level of seismic capacity according to the importance of their equipment. After the Great East Japan Earthquake, the nuclear regulatory standards have been revised and demand a greater seismic capacity of related equipment. To meet the demand, Fuji Electric has been developing high-rigidity seismic-resistant switchboards that conform to the new regulatory standards. We evaluated the rigidity with natural frequency analysis and verified that dynamic components can retain their functions with vibration testing. The results show that we would achieve a target natural frequency of 30 Hz or more.

1　引言

以核电站为代表的核能相关设施，要求在确保安全性的基础上，主要配电柜不能因地震时产生的加速度而导致柜本身破损和内部电气装置误动作等。一般情况下，配电柜固有振动频率越高，地震时配电柜和内部电气装置产生的加速度（响应加速度）就会越低。因此，从安全角度考虑，重要的配电柜应采用比所设置的建筑物具有更高固有振动频率的刚性结构，确保耐震性。

2011 年发生东日本大地震以后，随着商用核电站对配电柜耐震性强化措施的推进，耐震配电柜的需求不断高涨。富士电机曾向以国立研究开发法人 日本核能研究开发机构为中心的研究设施交付过耐震配电柜。同时，我们还致力于开发耐震配电柜，以期作为商用核电站的耐震配电柜而被采用。开发期间需攻克的课题如下。

用于研究设施的耐震配电柜，设计时只需采用固有振动频率 20 Hz 以上的刚性结构即可。但是，用于商用核电站的耐震配电柜有时固有振动频率要求在 30 Hz 以上，因此需要有与之对应的结构。

2013 年 7 月修订的“商业用核能发电炉相关新管制基准”（新管制基准）修改了设计时必须考虑的地震规模，需具备比以前更加严格的耐地震力（配电柜产生的加速度）结构。

本文将对本公司开发出的、符合新管制基准的耐震配电柜进行介绍。

2　耐震设计

在传统的耐震设计中，耐震配电柜的耐震强度比设计用地震力要高得多，以水平加速度 1 G、垂直加速度 0.5 G 为基准。东日本大地震后，政府决定修改耐震设计中使用的基准地震动，要求配电柜拥有更高的耐震性。设计用地震力需要考虑设置地区的地基，这样会因地区而异，其最大值为水平加速度 3 G、垂直加速度 2 G。

虽然耐震配电柜的固有振动频率只需达到 20 Hz 以上就足够了，但有些地区可能需要在 30 Hz 以上，因此我们将开发目标定在 30 Hz 以上。

耐震设计条件如下所示。

(a)　固有振动频率：30 Hz 以上

(b)　耐加速度：水平方向 3 G 以上、垂直方向 2 G 以上

耐震配电柜的开发流程如**图 1** 所示。柜设计的步骤分为刚性结构设计、动态装置的功能维持验证和实机模型验证这三项。

(1)　刚性结构设计

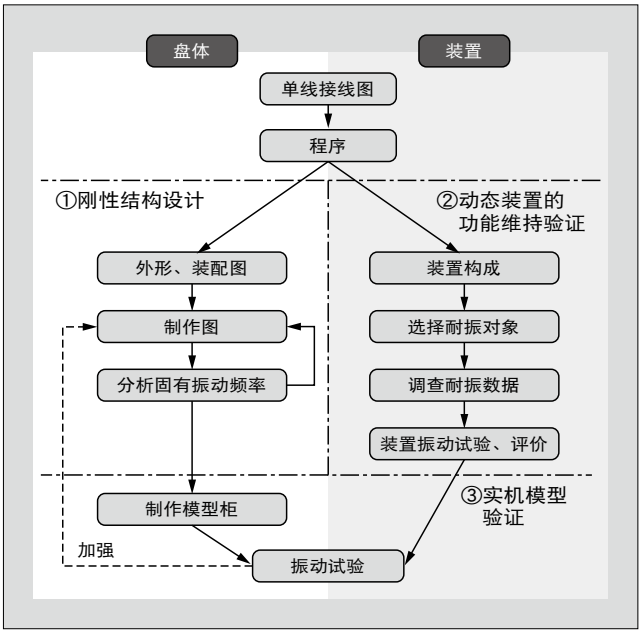


图 1　耐震配电柜的开发流程

根据制作图进行柜体的固有振动频率分析。通过进行增加梁和变更板厚等结构调整，使柜体的固有振动频率达到目标值。

⑵ 动态装置的功能维持验证

在柜内的收纳装置中，带可动部的动态装置（断路器、保护继电器、辅助继电器、定时器等）无法通过结构分析确认其能否在发生地震时维持功能。因此，需要对装置单体实际施加振动进行评价，以掌握可维持功能的加速度。对于没有完全固定且带拉出部的装置，则需要与实机一样模拟固定状态后进行振动试验，掌握可维持功能的加速度。

⑶ 实机模型验证

为了验证⑴的结构设计效果，需要制作实机大小的模型柜即耐震验证用高压配电柜，通过振动试验确认固有振动频率。此外，还要将⑵中评价的收纳装置收纳到耐震验证用高压配电柜中，确认振动时的功能和稳固性。

3 高压配电柜的高耐震化

3.1 耐震配电柜的设计

高压配电柜是根据负荷设备的规格分配供应电力的设备，由断路器、保护继电器、辅助继电器、变量器、变流器等组成。

本次采用的高压配电柜将真空断路器（VCB）分别安装在上下 2 层，额定电流采用通常使用的 1200 A 或者 2000 A，分断容量设为 40 kA。保护继电器采用电力系统通常使用的数字型多功能继电器“F-MPC60B”。主要规格如**表 1** 所示。

高压配电柜在断路器等拉出装置的主电路断开部上配备了活门。断开并将断路器拉至试验位置后，会自动关闭活门，遮盖住主电路带电部件，可以提高检查时的安全性。此外，将主电路用辅助装置（仪器用变压器、接地仪器用变压器、避雷器）搭载在移动台车上，不仅方便更换，还实现了收纳空间的紧凑化。但是考虑了维护性，可轻松更换真空断路器等的结构在耐震性方面比较薄弱，需要下工夫进行改善。

表 1 高压配电柜的主要规格

项目		规格
高压配电柜	柜型号	JEM-1425 MWG
	额定电压、相数	7.2 kV、三相 3 线式
	额定频率	50/60 Hz
	额定母线电流	3000 A
	额定短时耐受电流	40 kA、2 秒
	额定绝缘电压	额定工频耐受电压：22 kV、1 分钟 雷电冲击耐受电压：60 kV
	外形	W1000×D2600×H2300（mm）
真空断路器（VCB）	额定操作电压	AC100/200 V、DC100/125 V
	额定分断电流	40 kA
	额定电流	1200 A、2000 A
	闭路操作方法	电动弹簧方式

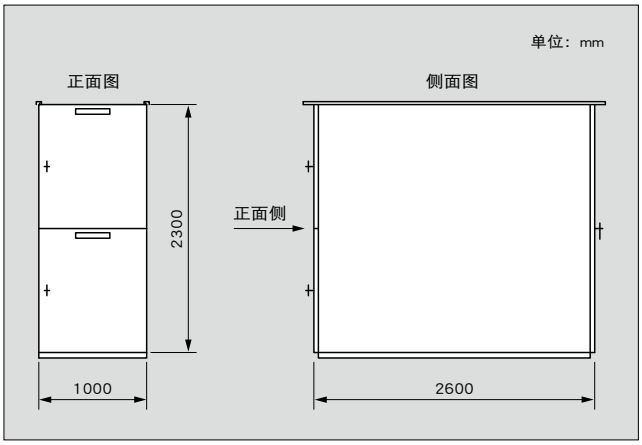


图 2 耐震验证用高压配电柜的外形图

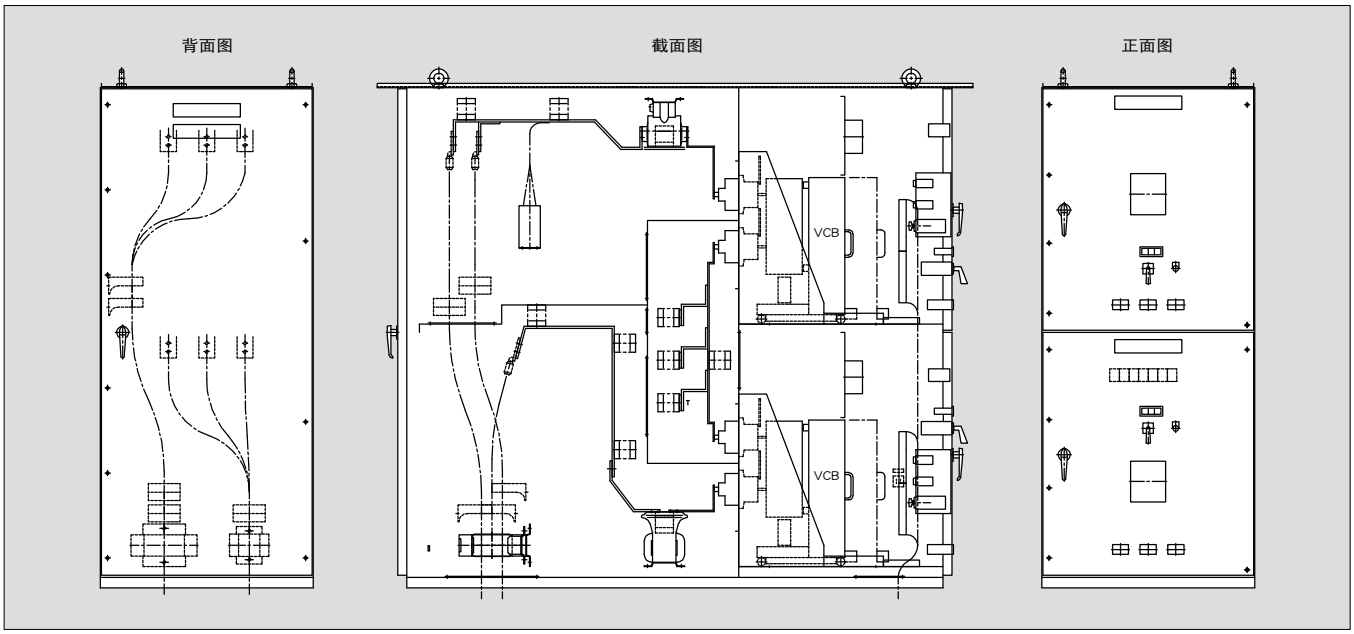


图 3 耐震验证用高压配电柜的装配图

因此，我们通过让柜的框架与装置的表面接触来抑制装置摇晃，确保耐震性，同时采用夹紧机构，以便进行固定和取放。此外，真空断路器无论在运行位置上还是在试验位置上都能确保耐震性。耐震验证用高压配电柜的外形图如**图 2** 所示，装配图如**图 3** 所示。

3.2　固有振动频率分析

我们根据基于耐震设计的柜设计图，利用结构分析软件 NX NASTRAN 实施了固有振动频率分析。分析结果如**图 4** 所示。结果发现 36.7 Hz 时整个柜外壳会发生摇晃，并确认到固有振动频率满足耐震设计条件。

3.3　耐震验证用高压配电柜的制作

图 5 为耐震验证用高压配电柜的外观。为了强化耐震性，用方管构成骨架（纵向柱和顶棚共 8 条边），与侧门板组合提高刚性。此外，为了确保 30 Hz 以上的固有振动频率，还强化了机架与柜主体之间的连接。

3.4　振动试验

为了验证高压配电柜的耐震性而实施了振动试验。**图 6** 为安装至振动台的情况和柜内装置安装情况。

为了确认固有振动频率和测定耐加速度，我们在柜外壳和主要内部收纳装置上安装了加速度计，测定了振动时的响应加速度。在输入加速度 100 Gal〈注 1〉（正弦波）时，我们以 0.1 Hz/s 的频率扫描 5 ～ 50 Hz 范围，测定了水平、垂直 3 个方向的固有振动频率。**图 7** 为在水平方向（深度方向）上，以安装在振动台上的加速度计为基准绘制的安装在柜体框架上的加速度计的响应倍率与频率的对应关系。响应倍率最大的频率为固有振动频率。此柜外壳的固有振动频率测定值为约 37 Hz，与通过分析计算出的值几乎一致。

而且，还获得了各方向的固有振动频率均会超过 30 Hz 的预测结果。

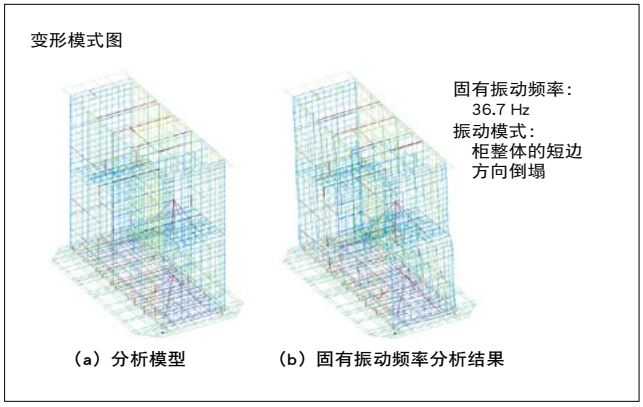


图 4　固有振动频率分析结果

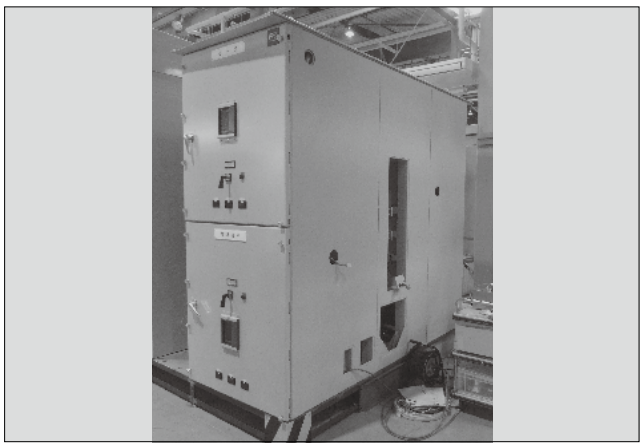


图 5　耐震验证用高压配电柜

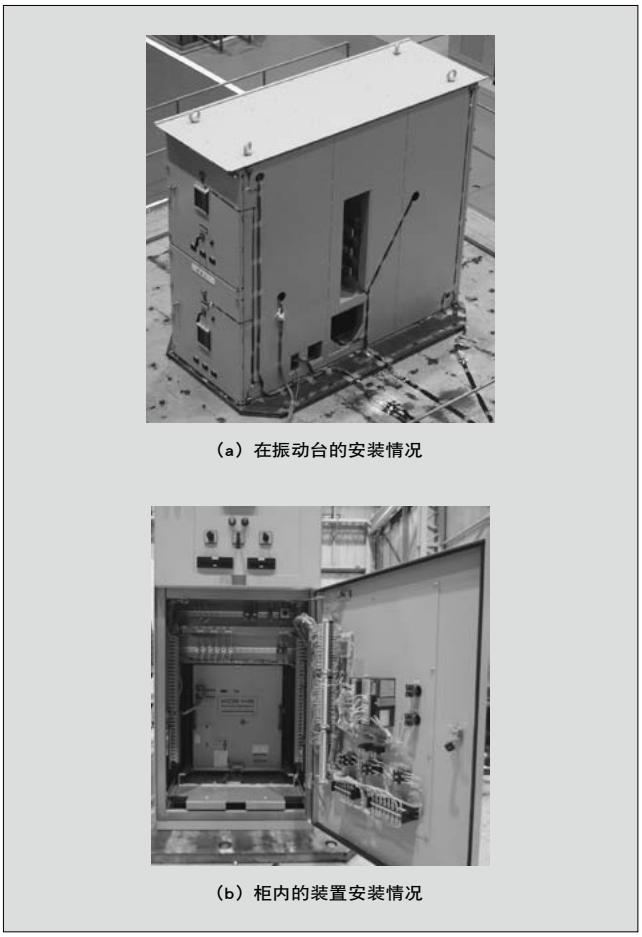


图 6　振动试验的情况

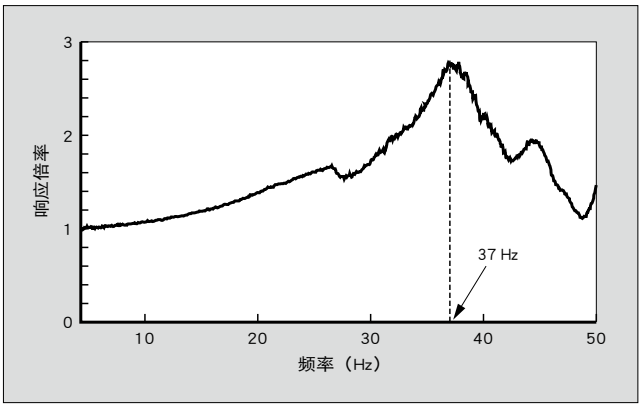


图 7　振动试验结果

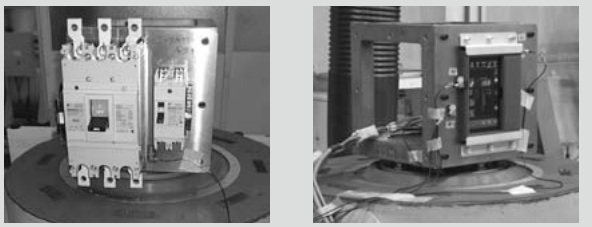
〈注 1〉Gal：加速度单位，1 Gal＝0.01 m/s^2

4 低压配电柜和收纳装置的高耐震化

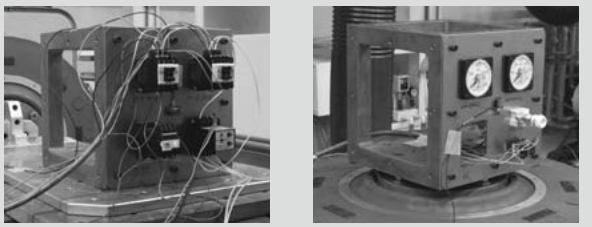
动力中心和控制中心等低压配电柜也在与高压配电柜一样的设计条件和步骤下进行开发，确保耐震性。

此外，我们还在柜体上安装有收纳装置的状态下实施振动试验，同时还实施了单体振动试验，以掌握各装置可确认功能得以维持的加速度。**图 8** 为装置振动试验的情况。

塑壳式断路器（MCCB）、保护继电器、辅助继电器等装置在高压配电柜和低压配电柜有可能使用相同的产品，对于重复品，在决定代表型号后用单体实施评价，从而掌握耐震性。



（a）塑壳式断路器　（b）保护继电器



（c）交流接触器和开关　（d）熔断器和仪表类

图 8　装置振动试验情况

5 后记

本文针对符合商业用核能发电炉相关新管制基准的耐震配电柜进行了介绍。在开发对应新管制基准的耐震配电柜时，从高压配电柜的收纳装置评价、耐震分析和应力分析开始，依次实施了低压配电柜的耐震分析、验证模型柜和掌握收纳装置极限加速度等。

本次在试制实机大小的高压配电柜后进行了振动试验，结果显示固有振动频率能够达到 30 Hz 这一目标。这样，针对从高压配电柜到低压配电柜的一系列配电柜，均开发出了可满足新管制基准等要求的耐震配电柜。

今后，我们将通过供应耐震配电柜，为提高以核电站为代表的核能相关设施的安全性做贡献。

今野　雅行

从事面向核能相关设施的电气设备的技术总管业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部发电成套设备事业部核能成套设备部主查。

藤本　义雄

从事配电柜的产品设计。现为富士电机株式会社电力电子机器事业本部神户工厂柜装置部课长助理。日本电机工业会开关装置技术专任委员。

长泽　武则

从事配电柜的结构设计。现为富士电机株式会社电力电子机器事业本部神户工厂柜装置部课长助理。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。