

一种改进的虚拟永磁风力发电系统模拟平台*

汪笃军, 刘天羽

(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 提出了一种包含风剪塔影效应的风力发电系统的改进型模拟方案。以背靠背三相变流器平台为基础, 建立了考虑包含风剪塔影效应的虚拟永磁直驱风力发电系统的数学模型, 进而搭建其控制系统; 针对简化叶尖速比与转矩系数拟合的问题, 提出了一种基于 Kalman 滤波的分段线性拟合的方法来简化拟合方程; 利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建虚拟风力发电系统模拟平台, 对负载变化时的模拟平台输出以及有无风剪塔影效应时风力机的机械转矩变化进行仿真分析。仿真结果表明, 该平台能够较好地模拟出风力机发电机组地运行特性。

关键词: 曲线拟合; 风剪塔影效应; 风力发电系统; 模拟平台

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0124-06

An Improved Virtual Permanent Magnet Wind Power Generator Simulation Platform*

WANG Dujun, LIU Tianyu

(College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A wind turbine generator improved simulator including wind shear and tower shadow effect was proposed. Based on 3-phase back-to-back converter platform, the control system was established on the mathematical models of the direct-driven permanent magnet wind power generator, it contained wind shear and tower shadow effect. In order to simplify the equation of the speed ratio and torque, a curve fitting method based on Kalman filter was proposed. It built the virtual platform in MATLAB/Simulink, which simulates the output of current, voltage and power as the load was changed. With the effect and without the effect, the mechanical torque output was simulated respectively. The simulation results showed that the platform could simulate the operation characteristics of wind turbine generator.

Key words: curve fitting; wind shear and tower shadow effect; wind power generation system; simulation platform

0 引言

主流的风力发电机主要有双馈型风力发电机和永磁直驱型风力发电机。永磁直驱发电机以其结构简单、体积小、重量轻和维护易等优点在我国更受青睐。由于风力发电系统研究工作的需要, 使得风力发电系统模拟平台的研究具有现实意义。

目前, 风力发电模拟平台按结构可以划分为三种: (1) 纯软件平台模拟, 利用软件工具箱在软件仿真平台上建立风力机、传动机构、风力发电机以及控制模块, 来模拟现实的风力发电系统的发电过程; (2) 机械实物模拟^[1], 以电动机作为原动机带动传动机构, 来拖动风力发电机, 通过对电动机的控制来模拟风力机、风力发电机的输出特性。

* 基金项目: 上海市自然科学基金项目(15ZR1417300, 14ZR1417200); 上海市教委创新基金项目(14YZ157, 15ZZ106); 上海电机学院研究生创新项目(B1-0225-008-008)

作者简介: 汪笃军(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电与微电网控制技术。

刘天羽(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能控制故障诊断。

(3) 逆变器模拟^[2-5], 建立风力机、传动机构以及风力发电机的数字化模型, 并将其引入逆变器控制策略中, 使逆变器的输出具有风力发电机输出的近似特性。文献[2]建立详细的风电发电系统模型, 而并未将风力机的转矩转速特性和传动装置的特性纳入控制策略中。基于文献[2,5]所提方法, 文献[3]进行模型优化, 使逆变器的输出很好地模拟出风力发电机输出特性, 但其未考虑风剪塔影效应, 且直流侧使用的是不控整流策略, 会导致谐波对电网侧产生污染。

经验公式法拟合精度较高但其涉及参数较多。文献中使用多项式拟合法只考虑转矩系数和叶尖速比的关系, 使拟合关系式只需解六次方程, 但其依赖于测试数据, 而数据的噪声对拟合会产生影响。本文在多项式拟合的基础上, 提出运用一种基于 Kalman 滤波分段直线拟合的方法, 对测试数据进行分段直线拟合处理, 滤出干扰的同时进一步简化了转矩系数与叶尖速比拟合的关系式。

本文在考虑风剪效应与塔影效应的基础上搭建了虚拟风力发电系统仿真平台, 建立了背靠背三相变流器的主电路来抑制电网侧谐波的污染; 提出了一种基于 Kalman 滤波的分段线性拟合的方法来简化拟合方程; 利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了虚拟永磁直驱风力发电系统仿真平台, 对负载变化时的电压、电流和功率的输出, 以及有无风剪塔影效应时风力机的机械转矩变化进行仿真分析。

1 数字化风力发电系统模型

本文旨在研究模拟永磁直驱型风力发电机, 故定义风力机、传动系统和风力发电机为风力发电系统, 如图 1 方框中结构所示。永磁直驱风力发电系统数学模型的建立, 是将发电系统的一般工作运行原理特性, 通过抽象的数学公式来描述, 以便应用于系统的分析与控制。本文构建了包含风剪塔影效应模型和数字化风力发电系统模型^[6-8]。

1.1 风力机气动特性

1.1.1 风剪塔影效应模型

风剪效应是指风速随高度的上升发生变化的特性对风力机吸收功率的影响; 而风速分布引起塔架颤动, 间接影响风力机吸收功率捕获转矩的现象, 被称为塔影效应^[9]。风剪与塔影效应的影

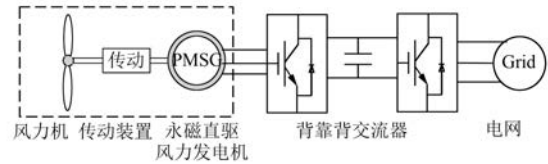


图1 永磁风力发电机原理结构图

响, 可以通过风速的等效来表示^[6,9-10]。风剪塔影效应数字化模型如下:

$$\begin{cases} v_0 = mv_H \\ m = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha-1)R^3}{8H^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_0 ——空间平均风速;

v_H ——轮毂处风速;

H ——地面距离轮毂中心的高度;

α ——风剪指数;

R ——风轮扫风半径。

$$\Delta v(n) = -\frac{\alpha(\alpha-1)R^3}{8H^2}v_H(n) + v_{eqws}(n) + v_{eqts}(n) \quad (2)$$

$$v_{eqws}(n) = v_H(n) \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \left(\frac{R}{H} \right)^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \left(\frac{R}{H} \right)^3 \cos 3\theta(n) \right] \quad (3)$$

$$v_{eqts}(n) = \frac{mv_H(n)}{3R^2} \sum_i^3 \left\{ \frac{-2a^2R^2}{R^2 \sin^2 \theta_i(n) + x^2} + \frac{a^2}{\sin^2 \theta_i(n)} \ln \left[\frac{R^2 \sin \theta_i(n)}{x^2} + 1 \right] \right\} \quad (4)$$

式中: $\theta_i (i=1,2,3)$ ——叶片的方位角;

x ——叶片到塔筒距离的水平分量;

a ——塔筒半径。

$$\begin{cases} T_w(n) = \frac{1}{2} \rho \pi C_T [\lambda(n)] R^3 m^2 v_H^2(n) \\ T_{w+st}(n) = T_w(n) + \rho \pi C_T [\lambda(n)] R^3 m v_H(n) \Delta v(n) \\ C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{blade}}{P_{wind}} = C_T(\lambda, \beta) \frac{R\omega}{v} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{w+st} ——等效转矩;

$C_p(\lambda, \beta)$ ——风能利用系数;

P_{wind} ——叶片扫掠面的总功率;

P_{blade} ——风力机输出的机械功率;

$C_T(\lambda, \beta)$ ——风力机的转矩系数;
 v ——轮毂处风速;
 R ——扫略面半径;
 ω ——风力机旋转角速度;
 定义 $\lambda = \omega R / v$ ——叶尖速比。

1. 1. 2 基于 Kalman 滤波的分段直线 $C_T(\lambda, \beta) - \lambda$ 拟合

针对 $C_T(\lambda, \beta) - \lambda$ 曲线的拟合复杂性和精度问题, 本文在经典多项式拟合的基础上, 提出一种运用 Kalman 滤波法对数据进行分段直线拟合的改进方法, 进一步简化了拟合方程。其改进拟合方法步骤如下:

- (1) 根据文献[11]所提方法利用 Kalman 滤波最小二乘拟合法对原始数据进行预处理。
- (2) 分别用 2 次, 3 次, 6 次多项式对处理后的数据进行拟合, 观察拟合图像轮廓, 确定拟合直线的数量。
- (3) 根据 6 次多项式图像轮廓估计出其极值点 λ_p , 以极值点为分隔点将处理后数据分为两组, 分别进行一次拟合。

按上述方法对数据进行拟合处理, 可以滤除数据中存在的噪声, 在简化拟合关系式的同时, 保证分段直线拟合的精度。

$$C_T(\lambda, \beta) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot \lambda^i \quad (6)$$

$$C_T(\lambda, \beta) = \begin{cases} A_1 + B_1 \lambda, & \lambda \leq \lambda_p \\ A_2 + B_2 \lambda, & \lambda > \lambda_p \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、式(7)分别为多项式拟合和分段直线拟合的一般关系式。从式(7)中可以看出, 本小节所提拟合方法可以实现拟合关系的以直代曲, 简化拟合关系式。

1. 2 传动装置

机械角速度变化量、传动系统的机械角速度、旋转角度以及磁场旋转角速度和旋转角度相互关系如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta\omega_r(n) = \frac{\Delta T}{J_a} [T_w(n) - T_e(n) - B_m \omega_r(n)] \\ \omega_r(n+1) = \omega_r(n) + \Delta\omega_r(n) \\ \theta_r(n+1) = \theta_r(n) + \Delta T \omega_r(n) \\ \omega_s(n+1) = p_n \omega_r(n) \\ \theta_s(n+1) = \theta_s(n) + \Delta T \omega_s(n+1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω_r ——风力机叶轮旋转的角速度;
 J_a ——风力机的等效转动惯量;
 T_e ——电磁转矩;
 B_m ——传动装置的阻尼系数;
 p_n ——极对数;
 θ_r ——角度。

1. 3 永磁直驱型风力发电机

风力发电机旋转坐标下电压公式为

$$\begin{bmatrix} u_d^*(n+1) \\ u_q^*(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_s(n+1)\psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_s & -L_q \omega_s(n+1) \\ L_d \omega_s(n+1) & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(n) \\ i_q(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

风力发电机的电磁转矩为

$$T_e(n) = 1.5p\psi_f i_q(n) \quad (10)$$

式中: p ——发电机的极对数。

2 虚拟风力发电模拟平台

基于上述风力发电系统数学模型, 构建虚拟的永磁直驱型风力发电系统, 且以三相背靠背变流器为主体框架搭建风力发电系统的模拟平台。由于模拟平台重点在于研究单机风力发电系统发电机侧的输出特性, 故将负载侧以纯电阻代之。

将上节中的数字化模型引入负载侧的变流器控制系统中, 构建成如图 2 所示的虚拟风力发电系统, 以此模拟永磁直驱式风电系统的输出。图 2 展示出虚拟永磁直驱风力发电仿真平台的控制逻辑关系, 对网侧变流器的控制使其输出稳定直流电压, 以此为负载侧的逆变环节提供稳定的电压源; 负载侧变流器通过虚拟风力发电系统的控制, 来模拟风电系统的输出。

在保证整个系统稳定的前提下, 背靠背变流器采用经典电流内环和电压外环控制, 文献[12-14]分别给出了整流器和逆变器控制系统参数的整定方法, 在此不加赘述。

3 MATLAB/Simulink 仿真分析

3. 1 基于 Kalman 滤波的分段直线 $C_T(\lambda, \beta) - \lambda$ 拟合仿真

根据文献[5]所提供某型号风力机参数如表 1 所示, 由式(5)得原始数据 $C_T(\lambda, \beta) - \lambda$, 原始数据与经 Kalman 预处理后的数据如表 2 所示。

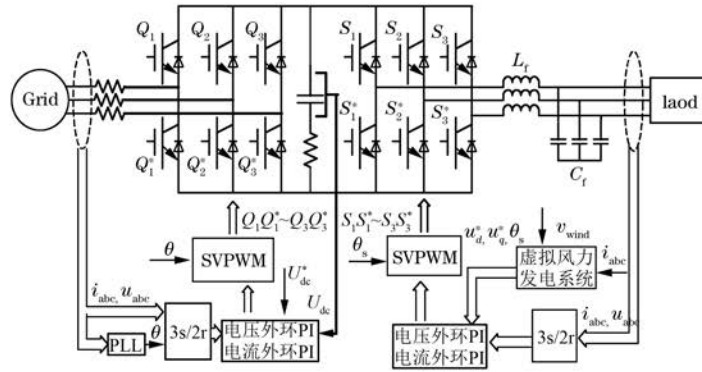


图2 虚拟风力发电平台控制逻辑示意图

表1 某型号风力机风速-转矩参数表

风力机转速 ω / (rad/s)	风力机输出转矩 T_e / (N·m)
0	12
5	35
10	90
15	138
20	150
25	123
30	27
40	0.1

表2 $C_T(\lambda, \beta) - \lambda$ 数据

λ	原始 $C_T(\lambda, \beta)$	预处理后 $C_T(\lambda, \beta)$
0	0.005 9	0.006 1
1.562 5	0.017 3	0.017 4
3.125 0	0.044 4	0.044 8
4.678 0	0.068 1	0.067 9
6.250 0	0.070 4	0.071 2
7.812 5	0.060 7	0.061 2
9.375 0	0.013 3	0.031 0
12.500 0	0	0.000 1

表2中经6次多项式拟合与直线分段拟合后如图3所示,表中“*”和“☆”分别为原始数据和处理后的数据。

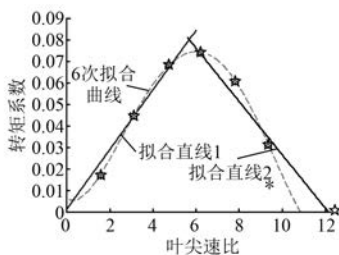


图3 拟合曲线图

将表2中数据分别进行6次多项式拟合,拟合后所得系数如表3所示。

表3 拟合系数

参数	未处理拟合系数	处理后拟合系数
a_0	0.005 963 1	0.006 109 2
a_1	-0.011 190 23	-0.005 868 1
a_2	0.018 584 9	0.011 734 6
a_3	-0.005 606 9	-0.002 518 5
a_4	0.000 871 2	0.000 250 8
a_5	-0.000 071 9	-0.000 015 7
a_6	0.000 002 3	0.000 000 4

由处理后的6次多项式可计算 $\lambda_p \approx 5.58$, 并根据1.1.2小节所提方法,拟合出分段直线关系式,其系数如下:

$$\begin{cases} A_1 = 0.001\ 380\ 0, & B_1 = 0.013\ 843\ 2 \\ A_2 = 0.150\ 477\ 1, & B_2 = -0.012\ 399\ 5 \end{cases}$$

3种拟合方法误差平方和如表4所示,从表4中可以看出。基于Kalman滤波的6次拟合精度最好,分段直线次之,直接拟合效果最差。但基于Kalman滤波的分段直线拟合表达式更为简洁,其精度也能够满足一般试验需求。

表4 误差平方和

拟合方法	拟合误差平方和
原始数据6次拟合	3.111 284 2e-004
处理后6次拟合	3.833 838 6e-006
分段直线1	4.736 300 0e-005
分段直线2	2.558 417 1e-004

3.2 风力发电系统模拟平台仿真

将改进后风力机模型、传动装置模型以及风力发电机模型用二级S-Function封装成相应虚拟

模块,并结合上述分析,在 MATLAB/Simulink 上使用封装的虚拟模块,根据图 3 搭建风力发电系统的模拟平台的仿真模型。仿真模型中,模型参数见表 5,系统参数见表 6。

表 5 仿真模型参数表

参数名称	网侧变流器线路	负载侧变流线路
线路电感 L/mH	8	15.6
线路电阻 R/Ω	0.01	-
线路电容 $C/\mu\text{F}$	-	9.624 4
电流环比例系数 K_{ip}	2.25	5
电流环积分系数 K_{ii}	20.65	100
电压环比例系数 K_{vp}	1	0.006
电压环积分系数 K_{vi}	6	2.8

表 6 虚拟风力发电系统参数

系统参数名	数值
轮毂高度 H/m	20
塔筒半径 a/m	1
风剪指数 α	0.15
扫风面半径 R	3.5
叶片轮毂最小距离 x	0.8
阻尼系数 B_m	1
转动惯量 $J_d/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2.5
电感 $L_d/(\text{mH})$	10
磁链 ψ_f/Wb	2.5
极对数 p_n	16
等效电阻 R_s/Ω	2.25

在虚拟永磁风力发电系统模拟平台上,分别进行了负载变化时风力发电机电压、电流及功率输出的模拟仿真,并对不控整流和 SVPWM 整流情况下网侧电压的线电压波形输出进行了仿真,最后仿真了忽略风剪塔影效应和考虑风剪塔影效应两种工况下的机械转矩输出,仿真结果如下。

图 4 和图 5 分别是负载发生变化时模拟平台的电压和电流输出。在模拟平台运行至 0.35 s 时负载由 50 Ω 变成 25 Ω ,电压幅值减小,电流幅值上升。由图 6 可见,在系统运行至 4 s 时负荷发生变化,其功率输出也发生变化。图 7 和图 8 分别是在不控整流和 PWM 整流下的网侧电压。从图 7、图 8 中可见不控整流的谐波含量多于 PWM 整流。从式(4)和式(5)可以看出,在风剪塔影效应的影

响下的输出可以等效为不计风剪塔影效应时的输出和扰动叠加。为了清晰展现风剪塔影效应的影响,模拟平台以恒定风速运行时,图 9 展示了有无风剪塔影效应的机械转矩输出。从其输出可见,忽略风剪塔影效应时,输出转矩近似直线;在风剪塔影效应影响下,输出转矩可看成直线与一系列脉动的叠加。因此也从侧面验证了式(3)和式(4)。

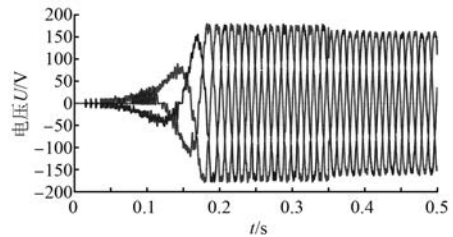


图 4 电压输出

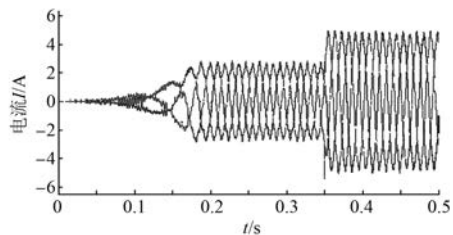


图 5 电流输出

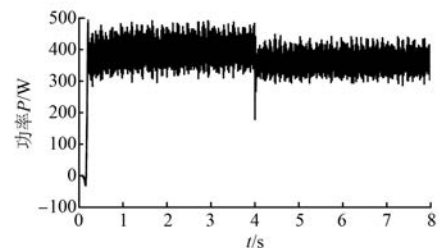


图 6 功率输出

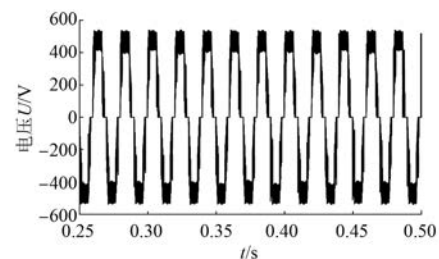


图 7 不控整流网侧线电压

4 结 语

本文在基于逆变器式风力发电机模拟平台的

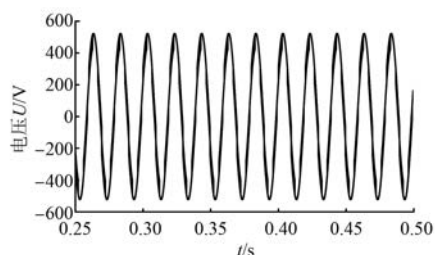


图8 PWM 整流网侧线电压

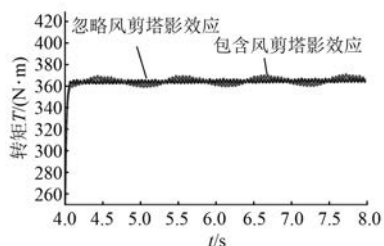


图9 转矩输出对比

研究基础上,提出了一种基于 Kalman 滤波的分段线性拟合的方法来简化 $C_T(\lambda, \beta) - \lambda$ 拟合方案;将风剪效应和塔影效应引入风力发电系统的模型中,构建基于背靠背变频器的风力发电系统模拟平台;将传统的模型功率输出与引入风剪塔影效应后的转矩进行简要的对比分析;在 MATLAB/Simulink 上搭建模型进行仿真,模拟出载荷发生变化时,电压、电流和功率的变化输出,验证风剪塔影效应对于转矩的影响。仿真结果表明,所提拟合方案既简化关系式,亦满足精度需要,且该平台能够较好地模拟出风力机发电机组的运行特性。

【参考文献】

- [1] 侍乔明,王刚,付立军,等.基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J].电网技术,2015,39(3): 783-790.
- [2] MAO M Q, NIU C Y, CHANG L C. A novel wind turbine generator simulator with three-phase VSI[C] // 5th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition Asia 2013 (ECCE Downunder) Downunder, 2013: 1196-1121.

- [3] 董颖.基于 VSI 的永磁直驱风力发电系统惯量特性模拟研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [4] SINOPOLI L, ORDONEZ M, QUAICOE J. DSP-based current turbine emulator using a 3-phase inverter[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2012: 2805-2810.
- [5] 茆美琴,董颖,牛成玉.基于 VSI 的永磁直驱风力发电机模拟器[J].电力电子技术,2013,47(11): 4-6.
- [6] 李少林,张兴,杨淑英,等.风力机动态模拟器的仿真研究[J].太阳能学报,2010,31(10): 1366-1372.
- [7] 叶航治.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [8] HUSAIN M A, TARIQ A. Modeling and study of a standalone PMSG wind generation system using MATLAB/Simulink [J]. Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2014, 2 (7) : 270-277.
- [9] 张兴,滕飞,谢震,等.风力机的风剪塔影模拟及功率脉动抑制[J].中国电机工程学报,2014,34(36): 6508-6510.
- [10] LU L, XIE Z, ZHANG X, et al. A dynamic wind turbine simulator of the wind turbine generator system [C] // Intelligent System Design and Engineering Application Sanya Hainan: IEEE, 2012: 967-970.
- [11] 王江荣.基于卡尔曼滤波算法的最小二乘拟合及应用[J].自动化与仪器仪表,2013,167(3): 140-142.
- [12] 沈阳武,彭晓涛,孙元章.背靠背双 PWM 变频器的协调控制策略[J].电网技术,2012,36(1): 146-149.
- [13] 邹高域,赵争鸣,袁立强,等.高性能三相背靠背变频器主电路参数设计[J].电力自动化设备,2014,34(1): 73-77.
- [14] 张兴,张崇巍.PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2012.

收稿日期: 2017 -03 -20

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

西门子助力中国工业加速数字化转型

西门子 11 月 7 日在第十九届中国国际工业博览会(工博会)上与海能达通信股份有限公司(海能达)签署战略合作协议,为其提供数字化顶层设计咨询、产品生命周期管理软件(PLM),以及完整的自动化解决方案。“西门子是全球唯一一家能在产品研发与制造过程以及工厂管理的完整价值链上提供‘数字化双胞胎’的企业。凭借这一优势,我们已经与中国各行业企业携手,在如汽车、电子、食品饮料、纺织、装备制造、制药和钢铁等行业打造数字化企业典范。”西门子(中国)有限公司执行副总裁、数字化工厂集团总经理王海滨表示,“与海能达的合作是西门子助力本土企业推进数字化转型的又一成果,我们将持续以电气化、自动化和数字化领域的先进技术为中国企业和社会创造价值。”

在今年的工博会上,西门子以“探索数字化企业价值”为主题,全面展示了其更为全面的“数字化企业”业务组合。西门子的数字化企业解决方案能够帮助客户实现更灵活、高效的生产,更短的上市时间和更好的产品质量,为客户带来真正的竞争优势。

观众可以在西门子展台远程参观其位于北京和上海的数字化体验中心,感受数字化企业解决方案为离散和过程工业所带来的生产力、效率、灵活性以及质量的提升。西门子还携手食品饮料生产企业杭州娃哈哈集团有限公司,展示了如何在生产全生命周期借助西门子的数字化企业解决方案,实现中央监控、柔性生产与质量追溯,并提升能效和生产效率。

西门子还展示了其基于云的开放式物联网操作系统 MindSphere。观众可以现场体验到如何借

助 MindSphere 进行数据采集和分析,将数据转化为价值,从而带来生产和服务的优化。自今年 6 月首次在中国市场发布以来,西门子正在逐步完善 MindSphere 的强大生态系统,携手合作伙伴深度挖掘数据的价值。8 月,西门子携手成都高新技术产业开发区建立西门子在华首个专注于 MindSphere 的研发中心,并于 9 月与香港科技园签署协议,在香港创建基于 MindSphere 的首个智能城市数字化中心。

过去一年间,西门子陆续与航天科工、河钢集团、宝武集团、金宇生物、凯赛生物、云南白药、九牧等企业达成合作,为其数字化升级提供咨询或解决方案,进而从数字化转型中获益。其中,西门子为航天科工打造的贵州智能制造车间项目,以及与宝钢工业技术服务有限公司合作建设的虚拟远程运维平台和标准研究项目均被列为“2017 年中德智能制造合作试点示范项目”。

“端到端的数字化为当前市场需求提供了最佳可用性和效率,帮助过程工业客户保持竞争优势。”西门子(中国)有限公司执行副总裁,过程工业与驱动集团总经理林斌表示,“西门子凭借自己在过程工业领域的特长为用户全生命周期的过程优化奠定基础,加快工厂的数字化转型。”

西门子积极响应“中国制造 2025”战略和“互联网+”行动,与中国分享“数字化企业”技术和解决方案,支持中国的产业转型与升级。今年 7 月,西门子与中国国家发展和改革委员会在既有合作框架下进一步签署在数字化技术创新和应用领域合作的谅解备忘录,将着力在中国数字制造领域加大研发和人才培养上的投入。

[西门子(中国)有限公司 供稿]