

基于傅立叶基函数神经网络算法的电力系统间谐波分析方法

宁薇薇¹, 裴源², 刘立彦³, 曾喆昭³

(1. 湖南省电力公司中心培训部, 湖南 长沙 410131; 2. 湖南省电力勘测设计院, 湖南 长沙 410007;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 间谐波是非整数倍基波频率的谐波信号。间谐波除了具有一般谐波信号的特性外, 还会影响谐波补偿装置, 因此准确检测间谐波参数对于电力系统具有十分重要的意义。提出了一种基于傅立叶基函数神经网络算法的电力系统谐波分析方法, 研究了该谐波分析方法的收敛性。为了验证该算法的有效性, 给出了利用该算法进行间谐波分析的仿真实例。仿真结果表明, 文中提出的间谐波分析方法具有计算精度高、训练速度快的特点, 因此在电力系统间谐波分析中具有较大的应用价值。

关键词: 神经网络; 电力系统; 谐波分析; 间谐波

Inter-harmonic analysis approach in power system using neural network algorithm with Fourier basis functions

NING Wei-wei¹, PEI Yuan², LIU Li-yan³, ZENG Zhe-zhao³

(1.Center Training Department, Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410131, China;

2.Hunan Electric Power Design Institute, Changsha 410007, China;

3.College of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Inter-harmonic is a kind of the harmonic which is not an integer of the fundamental frequency component. The inter-harmonic, same as the integer harmonic, has serious impacts on the design of harmonic compensation equipments, so it is important to analyze inter-harmonic accurately. An artificial neural network (ANN) algorithm based on the Fourier basis functions is presented in the paper by which the amplitudes and phase of harmonic and inter-harmonic could be obtained very fast. The convergence property of the algorithm is researched. In order to validate the algorithm's validity, the simulation examples of inter-harmonic analysis are given. The simulation results show that the proposed inter-harmonic analysis method is very accurate and the training speed is very fast, so it could be applied to power system inter-harmonic measurement.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60375001).

Key words: neural network; power system; harmonic analysis; inter harmonic

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0012-05

0 引言

随着电力电子技术和器件的发展, 非线性负荷在电力系统中的应用越来越广泛, 电力系统谐波和间谐波(包括次谐波)污染日益严重, 频率低于基波频率的间谐波(即次谐波)会引起光电闪变、低频继电器的异常运行以及无源电力滤波器过流跳闸等等。频率高于基波频率的间谐波对音频设备造成干扰, 还可能引起感应电动机噪声和振动, 因此间谐波现象正受到人们的日益重视。

电力系统的间谐波测量方法通常采用快速傅立

叶变换(FFT)来实现^[1-5], 然而电力系统的频率并非始终为额定工频, 无法保证采样频率为实际工作频率的整数倍, 因此存在栅栏效应和泄漏现象, 导致计算出的信号参数即频率、幅值和相位不准, 尤其是相位误差很大, 无法满足间谐波测量的要求。文献[6~9]提出了用插值算法消除栅栏效应引起的误差, 用加窗函数的方法消除频谱泄漏引起的误差, 该算法具有较高的精度, 但对各次间谐波的频率、幅值和相位都要进行单独校正, 计算量比较大, 无法满足实时监测电力系统间谐波的要求。文献[10, 11]提出了基于Prony算法的谐波和间谐波分析, 该方法可以准确地估计信号中各分量的振幅, 频率和相位, 但抗干扰性不强, 噪声会对结果的精确度造成一定的影响。此外, 奇异

基金项目: 国家自然科学基金项目(60375001)

值分解(SVD)^[12], 小波变换(WT)^[13,14] 也被用于分析电力系统间谐波, 结果较精确, 但是计算量大, 硬件实现比较困难。

本文提出了一种基于傅立叶基函数的神经网络算法, 研究了算法的收敛性。利用该算法可获得高精度电力系统谐波与间谐波的幅值和相位, 仿真计算表明, 基于傅立叶基函数的神经网络算法的间谐波测量方法具有计算精度高、计算量小的特点, 因此在电力系统的间谐波测量中有较大的应用价值。

1 基于神经网络算法的电力系统间谐波分析

1.1 傅立叶基函数神经网络模型

一个具有各次谐波和间谐波的周期信号可表示为:

$$y(t) = \sum_{n=0}^N A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) + \sum_{m=1}^M B_m \sin(2\pi \hat{f}_m t + \varphi_m) \quad (1)$$

式中: f_n 为第 n 次谐波的频率; A_n 、 φ_n 分别为第 n 次谐波的幅值及相位; N 为最高次谐波的次数; \hat{f}_m 为第 m 次间谐波的频率; B_m 、 φ_m 分别为第 m 次间谐波的幅值及相位; M 为最高次的间谐波。设采样周期为 T_s , 则式 (1) 可离散化为:

$$y(k) = A_0 + \sum_{j=1}^N [A_j \sin \varphi_j \cos(j\omega_0 k T_s) + A_j \cos \varphi_j \sin(j\omega_0 k T_s)] + \sum_{i=1}^M [B_i \sin \varphi_i \cos(\hat{\omega}_i k T_s) + B_i \cos \varphi_i \sin(\hat{\omega}_i k T_s)] \quad (2)$$

式中: ω_0 为电力系统基波角频率, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为工频频率; j 为谐波次数; A_0 为直流分量; $\hat{\omega}_i$ 为第 i 次间谐波的角频率; i 为间谐波次数; k 为采样点序列号; T_s 为采样周期。式 (2) 可进一步表示为:

$$y(k) = w_0 + \sum_{j=1}^N w_j \cos(j\omega_0 k T_s) + \sum_{j=N+1}^{2N} w_j \sin[(j-N)\omega_0 k T_s] + \sum_{i=1}^M \hat{w}_i \cos(\hat{\omega}_i k T_s) + \sum_{i=M+1}^{2M} \hat{w}_i \sin \hat{\omega}_{i-M} k T_s \quad (3)$$

由式 (3) 可建立神经网络模型如图 1 所示。

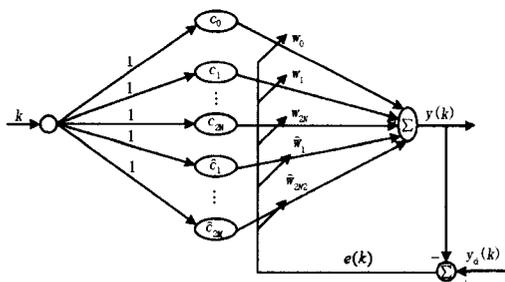


图 1 神经网络模型

Fig.1 The model of neural network

图 1 中: w 为神经网络权值, c 、 \hat{c} 为基函数, 即为隐层神经元激励函数。

$$\begin{cases} c_j = \cos(j\omega_0 k T_s) & (j=0,1,\dots,N) \\ c_j = \sin[(j-N)\omega_0 k T_s] & (j=N+1,N+2,\dots,2N) \\ \hat{c}_i = \cos(\hat{\omega}_i k T_s) & (i=1,2,\dots,M) \\ \hat{c}_i = \sin(\hat{\omega}_{i-M} k T_s) & (i=M+1,M+2,\dots,2M) \end{cases} \quad (4)$$

设权值矩阵为: $W = [w_0, w_1, \dots, w_{2N}, \hat{w}_1, \dots, \hat{w}_{2M}]^T$,

激励矩阵为

$$C = [c_0, c_1(\omega_0), \dots, c_{2N}(\omega_0), \hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_{2M}]^T,$$

则有神经网络输出:

$$y(k) = \sum_{j=0}^{2N} w_j c_j + \sum_{i=1}^{2M} \hat{w}_i \hat{c}_i = W^T C \quad (5)$$

误差函数为

$$e(k) = y_d(k) - y(k) \quad (k=0,1,\dots,K-1) \quad (6)$$

式中: $y(k)$ 为第 k 个采样值, K 为采样点数, 设性能指标为:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{K-1} e^2(k) \quad (7)$$

权值调整: 由式 (5)、(6)、(7) 有:

$$\Delta W = -\eta \frac{\partial J}{\partial W} = -\eta \frac{\partial J}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial W} = \eta e(k) C(k) \quad (8)$$

则

$$W(k+1) = W(k) + \eta e(k) C(k) \quad (9)$$

式中: η 为学习率, 且 $0 < \eta < 1$ 。

若已知电力系统的工作频率, 则可通过上述神经网络算法获得神经网络权值, 从而获得电力系统间谐波的幅值和相位。

1.2 傅立叶基函数神经网络收敛定理

定理 1 设 η 为学习率, 则当 $0 < \eta < \frac{2}{2N+2M+1}$ 时神经网络算法收敛, 其中, 隐层神经元个数为 $2N+2M+1$ 。

证明: 取 Lyapunov 函数为: $V(k) = \frac{1}{2} e^2(k)$, 则有:

$$\Delta V(k) = \frac{1}{2} e^2(k+1) - \frac{1}{2} e^2(k) \quad (10)$$

因为

$$e(k+1) = e(k) + \Delta e(k) = e(k) + \left(\frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right)^T \Delta \mathbf{W}$$

而 $\Delta \mathbf{W} = -\eta e(k) \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}}$, 于是有:

$$\Delta e(k) = -\eta e(k) \left(\frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right)^T \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} = -\eta e(k) \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 \quad (11)$$

其中: $\|\mathbf{X}\|_2^2 = \sum_{i=1}^n |x_i|^2$, 称为 Euclid 范数的平方,

$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$. 所以式 (10) 改写为:

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= \frac{1}{2} [e(k) + \Delta e(k)]^2 - \frac{1}{2} e^2(k) = \Delta e(k) \left[e(k) + \frac{1}{2} \Delta e(k) \right] = \\ &= -\eta e(k) \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 \left[e(k) - \frac{1}{2} \eta e(k) \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 \right] = \\ &= \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 e^2(k) \left(-\eta + \frac{1}{2} \eta^2 \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

由式 (12) 知, 要使神经网络收敛, 必须有下式成立, 即:

$$-\eta + \frac{1}{2} \eta^2 \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 < 0$$

因 $\eta > 0$, 所以有:

$$0 < \eta < \frac{2}{\left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2} \quad (13)$$

由式 (5)、(6) 可得:

$$\frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} = \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \mathbf{W}} = -\mathbf{C}(k)$$

因此

$$\begin{aligned} \left\| \frac{\partial e(k)}{\partial \mathbf{W}} \right\|^2 &= \|\mathbf{C}(k)\|^2 = \|\mathbf{C}(k)\|^2 = \\ &= \sum_{j=0}^{2N} |c_j(k)|^2 + \sum_{i=1}^{2M} |\hat{c}_i(k)|^2 \leq 2N + 2M + 1 \end{aligned} \quad (14)$$

因而由式 (13)、(14) 可知 $0 < \eta < \frac{2}{2N + 2M + 1}$

即当学习率 η 满足 $0 < \eta < \frac{2}{2N + 2M + 1}$ 时,

$\Delta V(k) < 0$, 因而本文讨论的傅立叶基函数网络算法是收敛的。证毕。

按照上述神经网络算法, 通过神经网络训练即可获得神经网络权值向量 \mathbf{W} , 而基波、谐波及间谐波的幅值和相位可根据最后得到的权值向量 \mathbf{W} 并利用下述公式得到:

基波幅值为:

$$A_1 = \sqrt{w_1^2 + w_{N+1}^2} \quad (15)$$

基波相位为:

$$\varphi_1 = \arctan(w_1 / w_{N+1}) \quad (16)$$

j 次谐波幅值为:

$$A_j = \sqrt{w_j^2 + w_{N+j}^2} \quad (17)$$

j 次谐波相位为:

$$\varphi_j = \arctan(w_j / w_{N+j}) \quad (18)$$

i 次间谐波幅值为:

$$B_i = \sqrt{\hat{w}_i^2 + \hat{w}_{M+i}^2} \quad (19)$$

i 次间谐波相位为:

$$\varphi_i = \arctan(\hat{w}_i / \hat{w}_{M+i}) \quad (20)$$

1.3 神经网络训练步骤

Step1. 以采样周期 T_s 对信号 $y(t)$ 采样获得训练样本; 随机产生权向量 \mathbf{W} , 给定任意小正实数 Tol , 由定理 1 确定学习率 $0 < \eta < \frac{2}{2N + 2M + 1}$, 令 $J = 0$;

Step2. 由式 (5) 计算神经网络的输出:

$$y(k) = \sum_{j=0}^{2N} w_j c_j + \sum_{i=1}^{2M} \hat{w}_i \hat{c}_i = \mathbf{W}^T \mathbf{C};$$

Step3. 由式 (6)、(7) 分别计算误差与性能指标:

$$e(k) = y_d(k) - y(k), \quad J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{K-1} e^2(k);$$

Step4. 由式 (9) 进行权值调整:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + \eta e(k) \mathbf{C}(k);$$

Step5. 判断性能指标是否满足 $J < Tol$? , 若满足, 结束训练, 否则返回 Step2 重复上述训练过程。

2 仿真实例

为了验证本文提到神经网络算法的正确性, 本文采用文献[7, 8]使用的信号进行仿真分析。

例 1 文献[7]使用的信号表达式为

$$y(k) = \sum_{m=1}^9 A_m \cos(2\pi f_m k T_s + \varphi_m) \quad (21)$$

式中: 采样频率为 1900 Hz, 采样点数为 1024 点, 各次间谐波的幅值 (为无单位数值) 及相位如表 1

所示。

表 1 文献[7]使用的信号包含的成分

Tab.1 Parameters of signal which is used in reference[7]

参数	频率	幅值	相位/(°)
谐波和间谐波	25	2.28	20
	50	380	10
	150	19	25
	175	1.9	30
	250	15.2	100
	330	1.52	120
	350	11.4	150
	380	1.14	180
	450	7.6	210

首先用文献[7]的方法计算出电力系统的频率。由于最高谐波次数为 9 次, 所以取神经网络拓扑结构为 $1 \times 19 \times 1$ 。设采样频率为 1900 Hz, 采样 1024 个点, 给定 $Tol = 10^{-5}$; 取学习率: $\eta = \frac{1.2}{2N + 2M + 1} = \frac{1.2}{19} = 0.068$, 随机产生权值, 经过 2 次神经网络训练, 得到性能指标为: $J = 2.6182 \times 10^{-8}$, 谐波和间谐波的幅值和相位如表 2 所示。

表 2 用本文算法对文献[7]中的信号进行分析的结果

Tab.2 Analysis results of the signal which used in reference [7] with the paper's algorithm

间谐波检测结果			
幅值	相对误差(%) $\times 10^{13}$	相位/(°)	相对误差(%) $\times 10^{12}$
2.2800	280.09	20.0000	465.94
1.9000	-1726.2	30.0000	393.02
1.5200	-38887	120.0000	-397.68
1.1400	13200	180.0000	-22.832
谐波检测结果			
380.00	1.6455	10.0000	-7.7272
19.000	138.56	25.0000	-51.088
15.200	-5.8433	100.0000	-29.800
11.400	-1103.1	150.0000	207.78
7.6000	319.04	210.0000	16.972

例 2 文献[8]使用的信号表达式为:

$$y(k) = \sum_{m=1}^7 A_m \cos(2\pi f_m k T_s + \varphi_m) \quad (22)$$

式中的采样频率为 1250 Hz, 采样点数为 1024 点, 各次间谐波的幅值(为无单位数值)及相位如表 3 所示。

由于最高谐波次数为 7 次, 所以取神经网络拓扑结构为 $1 \times 15 \times 1$, 采样频率为 1250, 采样 1024 个点, 给定 $Tol = 10^{-5}$; 给出学习率

$$\eta = \frac{1.2}{2N + 2M + 1} = \frac{1.2}{15} = 0.08, \text{ 经过 2 次神经网络训练, 得到性能指标为: } J = 2.3344 \times 10^{-22}, \text{ 谐波和间谐波的幅值和相位如表 4 所示。}$$

络训练, 得到性能指标为: $J = 2.3344 \times 10^{-22}$, 谐波和间谐波的幅值和相位如表 4 所示。

表 3 文献[8]使用的信号包含的成分

Tab.3 Parameters of signal which is used in reference [8]

参数	频率	幅值	相位/(°)
谐波和间谐波	25	1.86	10.0
	50	310	5.0
	165	0.62	20.0
	270	0.93	120.0
	350	12.4	150.0
	400	1.55	210.0
	450	15.5	260.0

表 4 用本文算法对文献[8]中的信号进行分析的结果

Tab.4 Analysis results of the signal which used in reference [8] with the paper's algorithm

间谐波检测结果			
幅值	相对误差(%) $\times 10^{13}$	相位/(°)	相对误差(%) $\times 10^{12}$
1.8599	-271.03	10.0000	532.21
0.6200	763.37	19.9999	-440.45
0.9299	-304.89	119.9999	-440.45
谐波检测结果			
310.00	4.0340	5.0000	9.4502
12.400	29.940	149.9999	-1.4211
1.5500	184.23	209.9999	-5.0482
15.500	10.887	260.0000	1.0931

由以上仿真结果可见, 本文提出的间谐波分析方法对各次谐波和间谐波的幅值和相位的计算精度高。例 1 分析结果与文献[7]采用加 Rife-Vincent 窗插值修正算法所得结果相比, 幅值计算精度提高了七个数量级, 相位精度提高了十个数量级。例 2 分析结果与文献[8]采用加 Hanning 窗的插值修正算法所得结果相比, 幅值和相位计算精度分别提高了九个数量级和十个数量级。

3 结论

由以上仿真结果可知, 本文提出的基于傅立叶基神经网络算法的电力系统间谐波分析方法具有计算精度高, 计算速度快的特点, 与文献[7]和文献[8]相比, 幅值计算精度分别提高了七个和十个数量级; 相位精度分别提高了九个和十个数量级, 因此, 该算法在电力系统谐波与间谐波分析中具有较大的应用价值。当然, 该方法还存在一定局限性, 当基波和间谐波频率未知时, 该方法无效。此外, 此方法无法有效的消除噪声的影响, 如何利用此方法在含有噪声的信号中检测出间谐波信号还需进一步研究。

参考文献

[1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北

- 京:机械工业出版社,1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics Elimination and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] Chu R F, Burns J J, Impact of Cycloconverter Harmonics[J].IEEE Trans on Industry Applications, 1989,25(3):427-435.
- [3] Rifai M R, Ortmeyer T H, McQuillan W J. Evaluation of Current Interharmonics From AC drivers[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2000, 15(3): 1094-1098.
- [4] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题 [J]. 供用电, 2001, 18(3):6-9.
LIN Hai-xue. Interharmonic in Electrical Power System[J]. Power Supply and Utilization, 2001, 18(3):6-9.
- [5] Gunther E W. Interharmonics in Electrical Power System[A].In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. Vancouver:2001.813-817.
- [6] 邹江锋, 刘涤尘, 谭子求, 等. 基于 FFT 算法的分次谐波测量与分析[J]. 高电压技术, 2003, 9(9):29-30.
ZOU Jiang-feng, LIU Di-chen, TAN Zi-qiu, et al. The Analysis and Measurement of Power System Sub-harmonic[J]. High Voltage Engineering, 2003,9(9): 29-30.
- [7] 钱昊, 赵荣祥. 基于插值 FFT 算法的间谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 11(21): 87-91.
QIAN Hao, ZHAO Rong-xiang. Interharmonics Analysis Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,11(21):87-91.
- [8] 祁才君, 王小海. 基于插值 FFT 算法的间谐波参数估计 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(1):92-95.
QI Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2003,18(1):92-95.
- [9] 郝江涛, 刘念, 辛晋渝, 等. 电力系统间谐波分析 [J]. 电力自动化设备, 2004, 12(12):36-39.
HAO Jiang-tao, LIU Nian, XING Jin-yu, et al. Study on Interharmonic of Power System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,12(12): 36-39.
- [10] 丁屹峰, 程浩忠, 吕干云, 等. 基于 Prony 算法的谐波和间谐波频谱估计 [J]. 电工技术学报, 2005, 10(10): 94-97.
DING Yi-feng, CHENG Hao-zhong, Lü Gan-yun, et al. Spectrum Estimation of Harmonics and Interharmonics Based on Prony Algorithm[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2005,10(10):94-97.
- [11] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计 [J]. 电网技术, 2005, 29(15): 81-84.
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Inter-harmonic Parameter Estimation Based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. Power System Technology, 2005,29(15): 81-84.
- [12] Lobo T, Kozina T, Koglin H J. Power Systems Harmonics Estimation Using Linear Least Squares Methods and SVD[J]. Proc IEE Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148(6): 567-572.
- [13] 任震, 黄群古, 黄雯莹, 等. 基于多频带小波变换的电力系统谐波分析新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 38-41.
REN Zhen, HUANG Qun-gu, HUANG Wen-ying, et al. New Methods of Power System Harmonics Analysis Based on Wavelet Transform with Multi Frequency Band[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 38-41.
- [14] Keaochantranond T, Boonseng C. Harmonics and Inter-harmonics Estimation Using Wavelet Transform[A]. In: IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition[C]. 2002.775-779.

收稿日期: 2007-10-11; 修回日期: 2007-11-19

作者简介:

宁薇薇(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析; E-mail: ningww81@163.com

裴源(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析;

刘立彦(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事电能质量分析。

《继电器》杂志更名为《电力系统保护与控制》

根据国家新闻出版总署文件(新出报刊[2008]647号)——关于同意《继电器》更名的批复, 同意《继电器》更名为《电力系统保护与控制》, 新编国内统一连续出版物号: CN41—1401/TM, 办刊宗旨及业务范围调整为: 关注科学发展, 理论联系实际, 面向应用, 为科研生产一线服务, 主要刊发涉及电力系统保护与控制专业领域的新技术、新成果及运行经验、技术改进、科学管理、技术规程、国外先进技术等方面的论文。

欢迎从事电力科研、设计及设备研制企事业单位的专业技术人员, 全国所有高校相关专业的师生, 发电厂、变电站、输配电系统及供电企业的专业技术人员, 从事电力生产、建设及经营管理部门的相关人员积极投稿, 继续关注和支持本刊的建设和发展, 共同将《电力系统保护与控制》杂志办得越来越好!