

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Haddad, et al., ***“Characterization of ZnO Surge Arrester Elements With Direct and Power Frequency Voltages”***, IEE Proceedings, Vol. 137; Pt. A; No. 5; September 1990, pp. 269-279.
- [2] A. Haddad and D. Warne, ***“Advance in High Voltage Engineering”***, The Institution of Electrical Engineers, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, Reprinted First Edition, 2007
- [3] ABB Switzerland Ltd, ***“Application Guidelines, Overvoltage Protection”***, Division Surge Arresters, Wettingen, Switzerland, 2009.
- [4] B.H. Lee and M.K Sung, ***“A New On-Line Leakage Current Monitoring System of ZnO Surge Arresters”***, Journal of Material Science and Engineering B, Vol.119; Issue 1; No. 15; May 2005, pp. 13 – 18.
- [5] B.H. Lee, H.J. Gil, ***“A New Approach to On-Line Monitoring for ZnO Surge Arresters”***, KIEE Int. Trans. on Electrophysics and Applications, Vol. 5-C, No. 3, 2005.
- [6] C. Heinrich, et al., ***“Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks - Comparison of Existing and Newly Developed Procedures”***, IEEE Trans. On PWRD, Vol. 16; No. 1, 2001.
- [7] C.A. Spellman, et al. (1997), ***“A Technique for on-Line Monitoring of ZnO Surge Arrester”***, Proceedings of the 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Canada, August 1997.
- [8] H. Liu, H. Hu, ***“Development of Tester of the Resistive Leakage Current of MOA”***, IEEE Power & Energy Society and State Grid of China, Sichuan University, Chongqing University and Wuhan University, 2010.
- [9] H.B. Mu., et al., ***“On-line Monitoring Technology for MOA on HV Transmission Line”***, IEEE 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008
- [10] International Standard IEC 60099-4, ***“Surge arresters-Part 4 : Metal-oxide surge arrester for a.c. systems”***, Second Ed., 2004-05.
- [11] International Standard IEC 60099-5, ***“Surge arresters - Part 5 : Selection and Application Recommendations”***, Ed. 1.1, 2000-03.
- [12] J. Lundquist, et al., ***“New Method For Measurement Of The Resistive Leakage Currents Of Metal-Oxide Surge Arresters In Service”***, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5; No. 4; November 1990, pp. 1811 – 1822.
- [13] J. Tang, et al., ***“Study of Multi-Coefficient Compensation Method on Resistive Current Passing Trough MOA”***, High Voltage Engineering, Vol.25; No.1; March 1999.
- [14] J. Woodworth, ***“Guide For Selecting an Arrester Field Test Method”***, ArresterFacts-002c, ArresterWorks, 2008.
- [15] K. Eda, et al., ***“Degradation Mechanism Of Nonohmic Zinc Oxide Ceramics”***, J. Appl. Phys., Vol. 51; No. 5; May 1980, pp. 2678–2684.
- [16] K. Eda, et al., ***“Zinc Oxide Varistors”***, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 5; No. 6; Nov-Dec 1989, pp. 28-41.

- [17] K.P. Mardira, et al., ***“Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters”***, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12; No. 1; February 2005, pp. 50 - 59.
- [18] L. Zhou, et al., ***“A Study on Variable Coefficient Compensation Method and Performance Diagnosis of Metal Oxide Arrester’s Operating State Detection”***, Electric Technology Transaction, Vol. 13; No.6, 1998.
- [19] L. Huijia, W. Chengjiang, H. Hanmei, ***“Development of Detector of the Resistive Leakage Current of Metal Oxide Surge Arrester Based on DSP”***, The International Conference on Electrical Engineering 2009.
- [20] L.T. Coffeen and J.E. McBride, ***“High Voltage AC Resistive Current Measurements Using a Computer Based Digital Watts Technique”***, IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 6, No. 2, April 1991.
- [21] M. Jaroszewski, P. Kostyla, K. Wieczorek, ***“Effect of Voltage Harmonics Content on Arrester Diagnostic Result”***, 2004 International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, July 5-9, 2004.
- [22] M. Kobayashi, et al., ***“Metal Oxide Surge Arrester”***, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21; No.6; December 1986, pp. 989 – 996.
- [23] M.F. Ariffin, ***“Challenges in Developing Surge Arrester Failure Detection Methodologies in TNB Distribution Network”***, 20th Int. Conf. on Electricity Distribution, Prague, 2009.
- [24] M.V. Lat, ***“Analytical Method for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arresters”***, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems”, Vol. PAS-104, No. 10, October 1985.
- [25] Novizon, et al., ***“Condition Monitoring of Zinc Oxide Surge Arresters”***, LabVIEW - Practical Applications and Solutions, Rijeka, Croatia, 2011, pp. 253-270.
- [26] Novizon, Z.A. Malek, Aulia, ***“A New Method to Separate Resistive Leakage Current of ZnO Surge Arrester”***, Teknik A, Vol. 2, No. 29, 2008.
- [27] S. Qin, ***“The Application of the Mathematical Method for Measurement of the Resistive Current of ZnO”***, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, 1995.
- [28] S. Shirakawa, et al., ***“Maintenance of Surge Arrester by a Portable Leakage Current Detector”***, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 3, No. 3, July 1988.
- [29] T. Klein, et al., ***“A New Monitoring System for Metal Oxide Surge Arresters”***, IEE Conference Publication No. 467, High Voltage Engineering Symposium. 22-27 August 1999.
- [30] T.K. Saha, K. P. Mardira, ***“Modeling Metal Oxide Surge Arrester for the Modern Polarization Based Diagnostics”***, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 6; December 2005.
- [31] Tyco Electronics, ***“LV and MV Metal-Oxide Surge Arresters Catalog”***, Energy Division, Munich, Germany, 2007.
- [32] V. Hinrichsen, ***“Monitoring of High Voltage Metal Oxide Surge Arresters”***, VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Eléctrico Bilbao, Paper 6.4, 1997
- [33] V. Larsen, et al., ***“In-Service Testing and Diagnosis of Gapless Metal Oxide Surge Arresters”***, IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 26th-30th November 2007.
- [34] Z. Abdul-Malek, et al, ***“Field Experience on Surge Arrester Condition Monitoring - Modified Shifted Current Method”***, AUPEC 2010, Sydney, 31st Aug - 3rd Sep 2010.

ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ผลทดสอบโดยการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาแสดงคุณลักษณะทาง
กระแส-แรงดัน ของกั๊บกักเสิร์จชนิด ZnO (รูปที่ 3.9)

Item	Test voltage		ZnO arrester rated voltage : Ur=21 kV(rms) Uc=17 kV(rms)		
			Measured leakage current		
	U(rms) (kV)	U/Ur (per unit)	It (μA)	Ic (μA)	Ir (μA)
1	1.05	0.05	5.92E-66	857.32	2.02E-05
2	2.10	0.10	4.17E-52	1,714.64	4.04E-05
3	3.15	0.15	5.25E-44	2,571.96	6.06E-05
4	4.20	0.20	2.93E-38	3,429.29	8.08E-05
5	5.25	0.25	8.41E-34	4,286.61	0.000101
6	6.30	0.30	3.69E-30	5,143.93	0.0001212
7	7.35	0.35	4.43E-27	6,001.25	0.0001414
8	8.40	0.40	2.06E-24	6,858.57	0.0001616
9	9.45	0.45	4.65E-22	7,715.89	0.0001818
10	10.50	0.50	5.92E-20	8,573.21	0.000202
11	11.55	0.55	4.75E-18	9,430.54	0.0002222
12	12.60	0.60	2.60E-16	10,287.86	0.0002424
13	13.65	0.65	1.03E-14	11,145.18	0.0002626
14	14.70	0.70	3.12E-13	12,002.50	0.0002828
15	15.75	0.75	7.46E-12	12,859.82	0.000303
16	16.80	0.80	1.45E-10	13,717.14	0.0003232
17	17.85	0.85	2.36E-09	14,574.46	0.0003434
18	18.90	0.90	3.27E-08	15,431.79	0.0003636
19	19.95	0.95	3.94E-07	16,289.11	0.0003838
20	21.00	1.00	4.17E-06	17,146.43	0.000404
21	22.05	1.05	3.93E-05	18,003.75	0.000424
22	23.10	1.10	0.000334	18,861.07	0.0004444
23	23.11	1.11	0.0004	18,942.72	0.00044777
24	23.12	1.12	0.0005	19,024.37	0.00045114
25	23.13	1.13	0.0006	19,106.02	0.00045451
26	23.14	1.14	0.0007	19,187.67	0.00045788
27	24.15	1.15	0.0025812	19,718.39	0.0004646
28	25.20	1.20	0.0182832	20,575.70	0.0004848

ตารางที่ ก.2 แสดงคุณลักษณะทาง กระแส-แรงดันของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO แสดงความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลรวม กระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT ในโปรแกรม MATLAB (รูปที่ 3.10)

Item	Test voltage		ZnO arrester rated voltage : Ur=21 kV(rms) Uc=17 kV(rms)		
			Measured leakage current		
	U(rms) (kV)	U/Ur (per unit)	It (μA)	Ir (μA)	Ir3 (μA)
1	14.70	0.70	282.8022376	6.24E-07	1.33E-07
2	15.75	0.75	303.0023974	1.49E-05	3.17124E-06
3	16.80	0.80	323.2025572	2.90E-04	6.17348E-05
4	17.85	0.85	343.402717	4.72E-03	0.001003811
5	18.90	0.90	363.6028769	6.55E-02	0.01391376
6	19.95	0.95	383.8030367	7.87E-01	0.16733248
7	21.00	1.00	4.04E+02	8.33E+00	1.7715936
8	22.05	1.05	4.25E+02	7.86E+01	16.71488
9	23.10	1.10	668.0406079	668.077146	142.07648
10	24.15	1.15	5162.4519	5162.490099	1097.488
11	25.20	1.20	36564.9639	36565.00373	7775.1744

ตารางที่ ก.3 ผลทดสอบโดยการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสรั่วความต้านทานที่ขึ้นต่อค่าแรงดันใช้งาน (รูปที่ 3.12, 3.14)

Test voltage		ZnO arrester rated voltage : Ur=21 kV(rms) Uc=17 kV(rms)		
		Measured resistive leakage current		
U(rms) (kV)	U/Uc (per unit)	Ir(Ur) (μA)	Ir (μA)	Ir/Ir(Ur) (per unit)
8.40	0.40	8.332279	4.13E-18	4.95E-19
9.45	0.45	8.332279	9.30E-16	1.12E-16
10.50	0.50	8.332279	1.18E-13	1.42E-14
11.55	0.55	8.332279	9.49E-12	1.14E-12
12.60	0.60	8.332279	5.20E-10	6.24E-11
13.65	0.65	8.332279	2.06E-08	2.48E-09
14.70	0.70	8.332279	6.24E-07	7.49E-08
15.75	0.75	8.332279	1.49E-05	1.79E-06
16.80	0.80	8.332279	0.00029	3.48E-05
17.85	0.85	8.332279	0.004721	5.67E-04
18.90	0.90	8.332279	0.065451	7.86E-03
19.95	0.95	8.332279	0.787136	9.45E-02
21.00	1.00	8.332279	8.332279	1.00E+00
22.05	1.05	8.332279	78.60886	9.43E+00
23.10	1.10	8.332279	668.0771	8.02E+01
24.15	1.15	8.332279	5162.49	6.20E+02
25.20	1.20	8.332279	36565.00	4.39E+03

ตารางที่ ก.4 ผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทานที่ขึ้นต่อค่าแรงดันใช้งาน (รูปที่ 3.13, 3.14)

Test voltage		ZnO arrester rated voltage $U_r=21\text{ kV(rms)}$		
		Measured third harmonic resistive leakage current		
U(rms) (kV)	U/U _c (per unit)	Ir3(U _r) (μA)	Ir3 (μA)	Ir3/Ir3(U _r) (per unit)
8.40	0.40	1.771594	0	0
9.45	0.45	1.771594	0	0
10.50	0.50	1.771594	0	0
11.55	0.55	1.771594	0	0
12.60	0.60	1.771594	0	0
13.65	0.65	1.771594	4.38995E-09	2.47797E-09
14.70	0.70	1.771594	1.32709E-07	7.49093E-08
15.75	0.75	1.771594	3.17124E-06	1.79005E-06
16.80	0.80	1.771594	6.17348E-05	3.48471E-05
17.85	0.85	1.771594	0.001003811	0.000566615
18.90	0.90	1.771594	0.01391376	0.007853810
19.95	0.95	1.771594	0.16733248	0.094453084
21.00	1.00	1.771594	1.7715936	1.000000000
22.05	1.05	1.771594	16.71488	9.434940384
23.10	1.10	1.771594	142.07648	80.19699326
24.15	1.15	1.771594	1097.488	619.4919647
25.20	1.20	1.771594	7775.1744	4388.802488

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-1 ขนาดแรงดันพิกัด $U_r = 21\text{ kV}$ (รูปที่ 4.3)

ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ						
Sample no.1		Code : NEW-1				
Date: 12/02/54		Amb. temp. 27 °C				
Start time: 13.45		Asm. pressure 1031 hPa				
Fnished time 15.15		R.H. 55 %				
Arrester Rating		Shunt R : 1.072E+03 Ω		Voltage divider C1 : 1.20E-09 F C2 : 6.00E-07 F Scale factor 501 : 1		
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV	Surge Arrester				
Test Voltage		Shunt Measured Volatge (V)				
				Calculated Current It (A)		
U/Ur (pu)	kV (rms)	U(rms)	U(peak)	It(rms)	It(peak)	Ir(peak)
0.40	8.40	0.263	0.365	2.45E-04	3.40E-04	6.10E-05
0.45	9.45	0.293	0.410	2.73E-04	3.82E-04	6.74E-05
0.50	10.50	0.321	0.454	2.99E-04	4.24E-04	7.37E-05
0.55	11.55	0.357	0.509	3.33E-04	4.75E-04	9.04E-05
0.60	12.60	0.390	0.554	3.64E-04	5.17E-04	9.47E-05
0.65	13.65	0.415	0.587	3.87E-04	5.48E-04	9.27E-05
0.70	14.70	0.449	0.631	4.19E-04	5.89E-04	9.90E-05
0.75	15.75	0.476	0.676	4.44E-04	6.31E-04	1.05E-04
0.80	16.80	0.509	0.720	4.75E-04	6.72E-04	1.10E-04
0.85	17.85	0.537	0.753	5.01E-04	7.02E-04	1.08E-04
0.90	18.90	0.568	0.797	5.30E-04	7.43E-04	1.14E-04
0.95	19.95	0.604	0.831	5.63E-04	7.75E-04	1.19E-04
1.00	21.00	0.642	0.886	5.99E-04	8.26E-04	1.27E-04

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-2 ขนาดแรงดันพิกัด $U_r = 21\text{ kV}$ (รูปที่ 4.4)

ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ						
Sample no.2		Code : NEW-2				
Date: 12/02/54					Amb. temp.	28 °C
Start time: 16.25					Asm. pressure	1031 hPa
Fnished time 17.30					R.H.	58 %
Arrester Rating		Shunt R : 1.072E+03 Ω		Voltage divider C1 : 1.20E-09 F C2 : 6.00E-07 F Scale factor 501 : 1		
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV	Surge Arrester				
Test Voltage		Shunt Measured Volatge (V)				
U/Ur (pu)	kV (rms)	U(rms)	U(peak)	It(rms)	It(peak)	Ir(peak)
0.40	8.40	0.228	0.321	2.13E-04	2.99E-04	1.98E-05
0.45	9.45	0.258	0.360	2.41E-04	3.36E-04	2.11E-05
0.50	10.50	0.290	0.409	2.71E-04	3.82E-04	2.25E-05
0.55	11.55	0.309	0.438	2.88E-04	4.09E-04	2.38E-05
0.60	12.60	0.341	0.477	3.18E-04	4.45E-04	2.28E-05
0.65	13.65	0.365	0.516	3.40E-04	4.81E-04	2.34E-05
0.70	14.70	0.387	0.545	3.61E-04	5.08E-04	2.27E-05
0.75	15.75	0.414	0.584	3.86E-04	5.45E-04	2.30E-05
0.80	16.80	0.436	0.623	4.07E-04	5.81E-04	2.54E-05
0.85	17.85	0.467	0.662	4.36E-04	6.18E-04	2.37E-05
0.90	18.90	0.499	0.701	4.65E-04	6.54E-04	2.40E-05
0.95	19.95	0.528	0.730	4.93E-04	6.81E-04	2.63E-05
1.00	21.00	0.565	0.769	5.27E-04	7.17E-04	2.56E-05

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ
 OLD-1 ขนาดแรงดันพิกัด $U_r = 21\text{ kV}$ (รูปที่ 4.5)

ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ						
Sample no.3		Code : OLD-1				
Date: 13/02/54		Amb. temp. 27 °C				
Start time: 14.15		Asm. pressure 1031 hPa				
Fnished time 15.05		R.H . 54 %				
Arrester Rating		Shunt R : 1.072E+03 Ω		Voltage divider C1 : 1.20E-09 F C2 : 6.00E-07 F Scale factor 501 : 1		
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV	Surge Arrester				
Test Voltage		Shunt Measured Volatge (V)				
				Calculated Current It (A)		
U/Ur (pu)	kV (rms)	U(rms)	U(peak)	It(rms)	It(peak)	Ir(peak)
0.40	8.40	0.457	0.661	4.26E-04	6.17E-04	3.36E-04
0.45	9.45	0.492	0.697	4.59E-04	6.50E-04	3.36E-04
0.50	10.50	0.546	0.771	5.09E-04	7.19E-04	3.69E-04
0.55	11.55	0.598	0.844	5.58E-04	7.87E-04	4.03E-04
0.60	12.60	0.650	0.954	6.06E-04	8.90E-04	4.50E-04
0.65	13.65	0.707	1.028	6.60E-04	9.59E-04	4.99E-04
0.70	14.70	0.756	1.065	7.05E-04	9.93E-04	5.03E-04
0.75	15.75	0.806	1.138	7.52E-04	1.06E-03	5.37E-04
0.80	16.80	0.856	1.211	7.99E-04	1.13E-03	5.70E-04
0.85	17.85	0.908	1.285	8.47E-04	1.20E-03	6.04E-04
0.90	18.90	0.954	1.358	8.90E-04	1.27E-03	6.37E-04
0.95	19.95	1.010	1.395	9.42E-04	1.30E-03	6.37E-04
1.00	21.00	1.083	1.468	1.01E-03	1.37E-03	6.70E-04

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-2 ขนาดแรงดันพิกัด $U_r = 21\text{ kV}$ (รูปที่ 4.6)

ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ						
Sample no.4		Code : OLD-2				
Date: 13/02/54					Amb. temp.	27 °C
Start time: 16.05					Asm. pressure	1031 hPa
Finished time 16.55					R.H .	54 %
Arrester Rating		Shunt R : 1.072E+03 Ω		Voltage divider C1 : 1.20E-09 F C2 : 6.00E-07 F Scale factor 501 : 1		
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV	Surge Arrester				
Test Voltage		Shunt Measured Volatge (V)				
				Calculated Current It (A)		
U/Ur (pu)	kV (rms)	U(rms)	U(peak)	It(rms)	It(peak)	Ir(peak)
0.40	8.40	0.378	0.568	3.53E-04	5.30E-04	2.50E-04
0.45	9.45	0.423	0.599	3.95E-04	5.59E-04	2.44E-04
0.50	10.50	0.469	0.662	4.38E-04	6.18E-04	2.68E-04
0.55	11.55	0.512	0.725	4.78E-04	6.76E-04	2.92E-04
0.60	12.60	0.554	0.788	5.17E-04	7.35E-04	3.16E-04
0.65	13.65	0.598	0.852	5.58E-04	7.95E-04	3.39E-04
0.70	14.70	0.650	0.946	6.06E-04	8.82E-04	3.93E-04
0.75	15.75	0.689	0.978	6.43E-04	9.12E-04	3.87E-04
0.80	16.80	0.724	1.041	6.75E-04	9.71E-04	4.11E-04
0.85	17.85	0.763	1.072	7.12E-04	1.00E-03	4.05E-04
0.90	18.90	0.812	1.135	7.57E-04	1.06E-03	4.29E-04
0.95	19.95	0.859	1.198	8.01E-04	1.12E-03	4.53E-04
1.00	21.00	0.907	1.261	8.46E-04	1.18E-03	4.77E-04

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ
 OLD-3 ขนาดแรงดันพิกัด $U_r = 21 \text{ kV}$ (รูปที่ 4.7)

ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ						
Sample no.5		Code : OLD-3				
Date: 13/02/54		Amb. temp. 26 °C				
Start time: 17.50		Asm. pressure 1031 hPa				
Finished time 19.15		R.H . 58 %				
Arrester Rating		Shunt R : 1.072E+03 Ω		Voltage divider		
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV	Surge Arrester		C1 : 1.20E-09 F		
Test Voltage		Shunt Measured Volatge (V)		C2 : 6.00E-07 F		
				Scale factor 501 : 1		
				Calculated Current It (A)		
U/Ur (pu)	kV (rms)	U(rms)	U(peak)	It(rms)	It(peak)	Ir(peak)
0.40	8.40	0.320	0.485	2.99E-04	4.52E-04	1.72E-04
0.45	9.45	0.352	0.554	3.28E-04	5.17E-04	1.95E-04
0.50	10.50	0.391	0.623	3.65E-04	5.81E-04	2.16E-04
0.55	11.55	0.410	0.673	3.82E-04	6.28E-04	2.31E-04
0.60	12.60	0.473	0.693	4.41E-04	6.46E-04	2.26E-04
0.65	13.65	0.506	0.762	4.72E-04	7.11E-04	2.56E-04
0.70	14.70	0.535	0.831	4.99E-04	7.75E-04	2.86E-04
0.75	15.75	0.566	0.831	5.28E-04	7.75E-04	2.61E-04
0.80	16.80	0.606	0.900	5.65E-04	8.40E-04	2.80E-04
0.85	17.85	0.648	0.970	6.04E-04	9.05E-04	3.10E-04
0.90	18.90	0.682	0.970	6.36E-04	9.05E-04	2.75E-04
0.95	19.95	0.720	1.039	6.72E-04	9.69E-04	3.04E-04
1.00	21.00	0.771	1.108	7.19E-04	1.03E-03	3.34E-04

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดัก
 เสรีในงานวิจัย เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-1
 (รูปที่ 4.12 -4.13)

ผลการทดสอบด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสรีในงานวิจัย					
Sample no.1		Code : NEW-1			
Date:	12/09/54	Voltage divider		Amb. temp.	27 °C
Start time:	13.35	C1 : 1.20E-09 F		Asm. pressure	1031 hPa
Finished time	14.15	C2 : 6.00E-07 F		R.H .	55 %
Arrester Rating		Scale factor 501 : 1			
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV				
Test Voltage		Tested Resistive Leakage Current (A peak)			Deviation (%)
U/Ur (pu)	kV (rms)	Ir(ref)	Ir(test)	Ir3(test)	
0.40	8.40	6.102E-05	6.175E-05	1.300E-05	1.18
0.45	9.45	6.736E-05	6.650E-05	1.400E-05	-1.29
0.50	10.50	7.370E-05	7.600E-05	1.600E-05	3.03
0.55	11.55	9.036E-05	8.550E-05	1.800E-05	-5.69
0.60	12.60	9.470E-05	9.025E-05	1.900E-05	-4.93
0.65	13.65	9.271E-05	9.510E-05	2.000E-05	2.42
0.70	14.70	9.904E-05	9.975E-05	2.100E-05	0.71
0.75	15.75	1.054E-04	1.045E-04	2.200E-05	-0.84
0.80	16.80	1.097E-04	1.045E-04	2.200E-05	-4.99
0.85	17.85	1.077E-04	1.093E-04	2.300E-05	1.40
0.90	18.90	1.141E-04	1.140E-04	2.400E-05	-0.05
0.95	19.95	1.191E-04	1.235E-04	2.600E-05	3.59
1.00	21.00	1.267E-04	1.283E-04	2.700E-05	1.19

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดัก
 เสรีในงานวิจัย เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-2
 (รูปที่ 4.15 -4.16)

ผลการทดสอบด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสรีในงานวิจัย					
Sample no.2		Code : NEW-2			
Date: 12/09/54		Voltage divider			Amb. temp. 31 °C
Start time: 15.05		C1 : 1.20E-09 F			Asm. pressure 1031 hPa
Finished time 16.00		C2 : 6.00E-07 F			R.H . 70 %
Arrester Rating		Scale factor 501 : 1			
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV				
Test Voltage		Tested Resistive Leakage Current (A peak)			Deviation (%)
U/Ur (pu)	kV (rms)	Ir(ref)	Ir(test)	Ir3(test)	
0.40	8.40	1.976E-05	1.995E-05	4.200E-06	0.97
0.45	9.45	2.109E-05	2.138E-05	4.500E-06	1.33
0.50	10.50	2.251E-05	2.185E-05	4.600E-06	-3.00
0.55	11.55	2.376E-05	2.280E-05	4.800E-06	-4.21
0.60	12.60	2.279E-05	2.375E-05	5.000E-06	4.02
0.65	13.65	2.343E-05	2.328E-05	4.900E-06	-0.66
0.70	14.70	2.268E-05	2.423E-05	5.100E-06	6.37
0.75	15.75	2.302E-05	2.446E-05	5.150E-06	5.91
0.80	16.80	2.535E-05	2.518E-05	5.300E-06	-0.70
0.85	17.85	2.369E-05	2.470E-05	5.200E-06	4.10
0.90	18.90	2.402E-05	2.518E-05	5.300E-06	4.59
0.95	19.95	2.627E-05	2.613E-05	5.500E-06	-0.57
1.00	21.00	2.561E-05	2.708E-05	5.700E-06	5.41



ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดัก
เสร็จในงานวิจัย เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-1
(รูปที่ 4.18 -4.19)

ผลการทดสอบด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสร็จในงานวิจัย					
Sample no.3		Code : OLD-1			
Date:	12/09/54	Voltage divider		Amb. temp.	30 °C
Start time:	16.25	C1 : 1.20E-09 F		Asm. pressure	1031 hPa
Finished time	17.10	C2 : 6.00E-07 F		R.H.	70 %
Arrester Rating		Scale factor 50I : 1			
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV				
Test Voltage		Tested Resistive Leakage Current (A peak)			Deviation (%)
U/Ur (pu)	kV (rms)	Ir(ref)	Ir(test)	Ir3(test)	
0.40	8.40	3.365E-04	3.396E-04	7.150E-05	0.92
0.45	9.45	3.357E-04	3.534E-04	7.440E-05	5.00
0.50	10.50	3.692E-04	3.729E-04	7.850E-05	0.97
0.55	11.55	4.027E-04	4.066E-04	8.560E-05	0.95
0.60	12.60	4.505E-04	4.323E-04	9.100E-05	-4.22
0.65	13.65	4.990E-04	4.726E-04	9.950E-05	-5.58
0.70	14.70	5.033E-04	5.083E-04	1.070E-04	0.98
0.75	15.75	5.368E-04	5.420E-04	1.141E-04	0.96
0.80	16.80	5.703E-04	5.619E-04	1.183E-04	-1.48
0.85	17.85	6.038E-04	6.099E-04	1.284E-04	1.01
0.90	18.90	6.373E-04	6.199E-04	1.305E-04	-2.80
0.95	19.95	6.365E-04	6.569E-04	1.383E-04	3.11
1.00	21.00	6.700E-04	6.769E-04	1.425E-04	1.01

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดัก
 เสรีในงานวิจัย เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-2
 (รูปที่ 4.21 -4.22)

ผลการทดสอบด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสรีในงานวิจัย					
Sample no.4		Code : OLD-2			
Date: 12/09/54		Voltage divider			Amb. temp. 28 °C
Start time: 17.35		C1 : 1.20E-09 F			Asm. pressure 1031 hPa
Finished time 18.40		C2 : 6.00E-07 F			R.H . 75 %
Arrester Rating		Scale factor 501 : 1			
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV				
Test Voltage		Tested Resistive Leakage Current (A peak)			Deviation (%)
U/Ur (pu)	kV (rms)	Ir(ref)	Ir(test)	Ir3(test)	
0.40	8.40	2.496E-04	2.522E-04	5.310E-05	1.03
0.45	9.45	2.441E-04	2.608E-04	5.490E-05	6.41
0.50	10.50	2.679E-04	2.708E-04	5.700E-05	1.05
0.55	11.55	2.918E-04	2.945E-04	6.200E-05	0.93
0.60	12.60	3.156E-04	3.159E-04	6.650E-05	0.08
0.65	13.65	3.395E-04	3.430E-04	7.220E-05	1.01
0.70	14.70	3.927E-04	3.729E-04	7.850E-05	-5.33
0.75	15.75	3.872E-04	3.909E-04	8.230E-05	0.96
0.80	16.80	4.110E-04	4.123E-04	8.680E-05	0.31
0.85	17.85	4.055E-04	4.232E-04	8.910E-05	4.20
0.90	18.90	4.293E-04	4.384E-04	9.230E-05	2.08
0.95	19.95	4.532E-04	4.579E-04	9.640E-05	1.04
1.00	21.00	4.770E-04	4.817E-04	1.014E-04	0.96

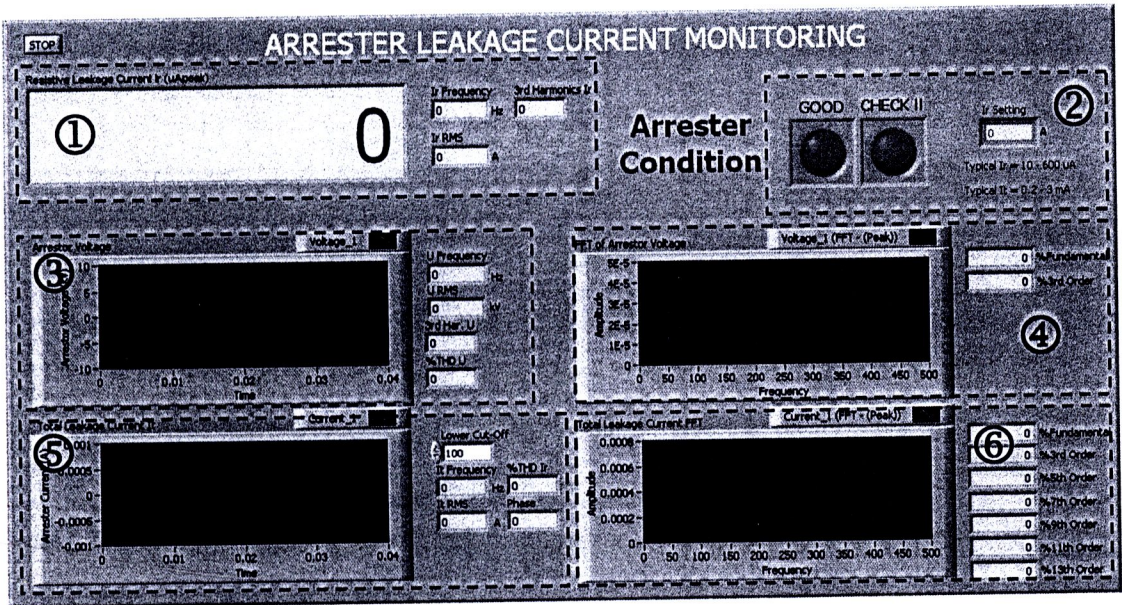
ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดัก
 เสรีในงานวิจัย เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-3
 (รูปที่ 4.24 -4.25)

ผลการทดสอบด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสรีในงานวิจัย					
Sample no.5		Code : OLD-3			
Date: 12/09/54		Voltage divider			Amb. temp. 27 °C
Start time: 19.05		C1 : 1.20E-09 F			Asm. pressure 1031 hPa
Finished time 20.00		C2 : 6.00E-07 F			R.H. 80 %
Arrester Rating		Scale factor 501 : 1			
Uc = 17 kV	Ur = 21 kV				
Test Voltage		Tested Resistive Leakage Current (A peak)			Deviation (%)
U/Ur (pu)	kV (rms)	Ir(ref)	Ir(test)	Ir3(test)	
0.40	8.40	1.724E-04	1.743E-04	3.670E-05	1.10
0.45	9.45	1.950E-04	1.843E-04	3.880E-05	-5.82
0.50	10.50	2.157E-04	2.209E-04	4.650E-05	2.36
0.55	11.55	2.313E-04	2.166E-04	4.560E-05	-6.78
0.60	12.60	2.263E-04	2.361E-04	4.970E-05	4.14
0.65	13.65	2.559E-04	2.584E-04	5.440E-05	0.96
0.70	14.70	2.856E-04	2.741E-04	5.770E-05	-4.19
0.75	15.75	2.606E-04	2.755E-04	5.800E-05	5.42
0.80	16.80	2.802E-04	2.831E-04	5.960E-05	1.03
0.85	17.85	3.098E-04	2.969E-04	6.250E-05	-4.36
0.90	18.90	2.748E-04	2.917E-04	6.140E-05	5.77
0.95	19.95	3.045E-04	3.263E-04	6.870E-05	6.70
1.00	21.00	3.341E-04	3.373E-04	7.100E-05	0.94

ภาคผนวก ข

ส่วนแสดงผลวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสร็จ

ส่วนแสดงผลวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเล็รจ



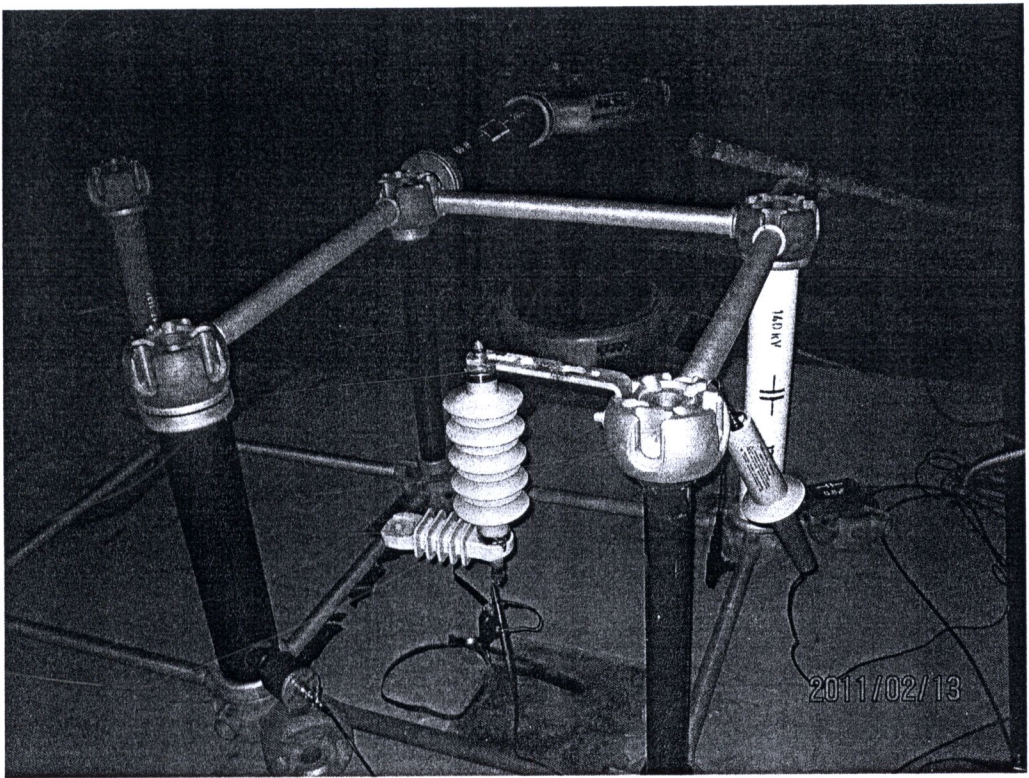
รูปที่ ข.1 ส่วนแสดงผลวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเล็รจ

- ① แสดงผลค่ากระแสรั่วความต้านทาน (μApeak)
 - กระแสรั่วความต้านทาน (μArms)
 - ความถี่ (Hz)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทาน (%)
- ② แสดงสภาพการทำงานของกัปดักเล็รจ (GOOD / CHECK)
 - ค่าปรับตั้งสัญญาณเตือนกระแสรั่วความต้านทานสูงสุด (μApeak)
- ③ แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันคร่อมกัปดักเล็รจ
 - ความถี่ (Hz)
 - แรงดัน (kVrms)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดัน (%)
 - Total Harmonic Distortion – THD (%)

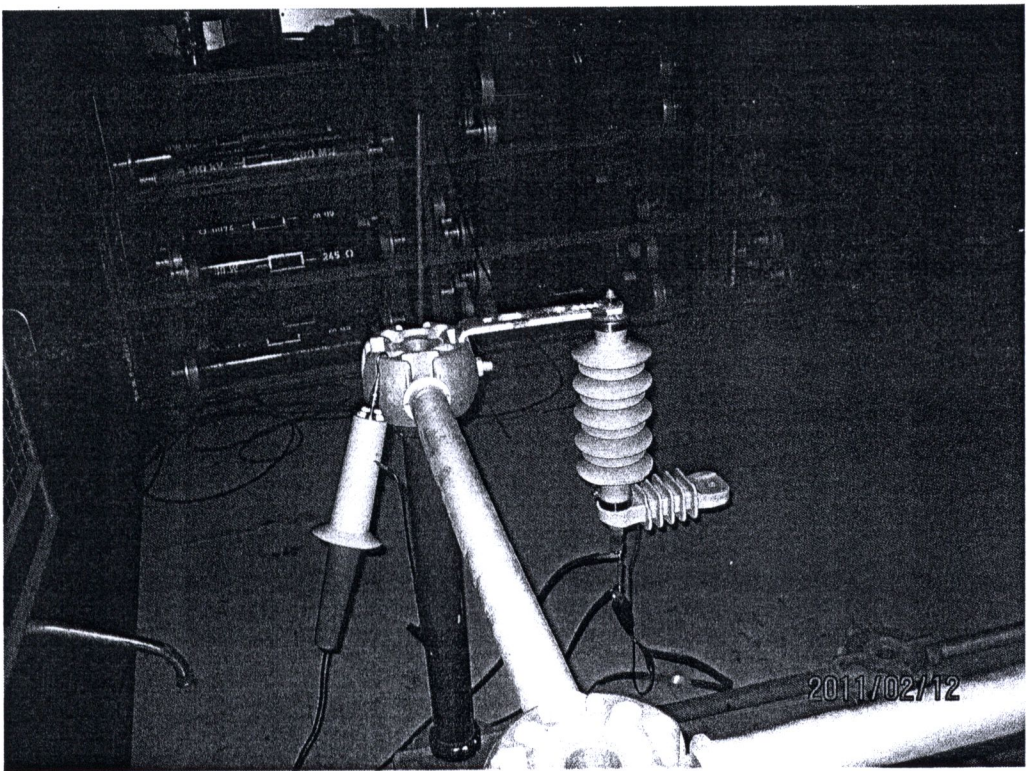
- ④ แสดงออกสซัลโลแกรมของกระแสรั่วไหลรวม
- ค่าปรับตั้งความถี่ cut-off ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (kHz)
 - กระแสรั่วไหลรวม (μArms)
 - ความถี่ (Hz)
 - มุมเฟสเทียบกับแรงดันคร่อมกับดักเสิร์จ (degree)
 - Total Harmonic Distortion – THD (%)
- ⑤ แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของแรงดันคร่อมกับดักเสิร์จจากวงจร FFT
- ส่วนประกอบความถี่พื้นฐานที่ความถี่ 50 Hz (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)
- ⑥ แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสรั่วไหลรวมจากวงจร FFT
- ส่วนประกอบความถี่พื้นฐานที่ความถี่ 50 Hz (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ของกระแสเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 7 ของกระแสเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 9 ของกระแสเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 11 ของกระแสเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)
 - ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 13 ของกระแสเทียบกับค่าที่ความถี่พื้นฐาน (%)

ภาคผนวก ค

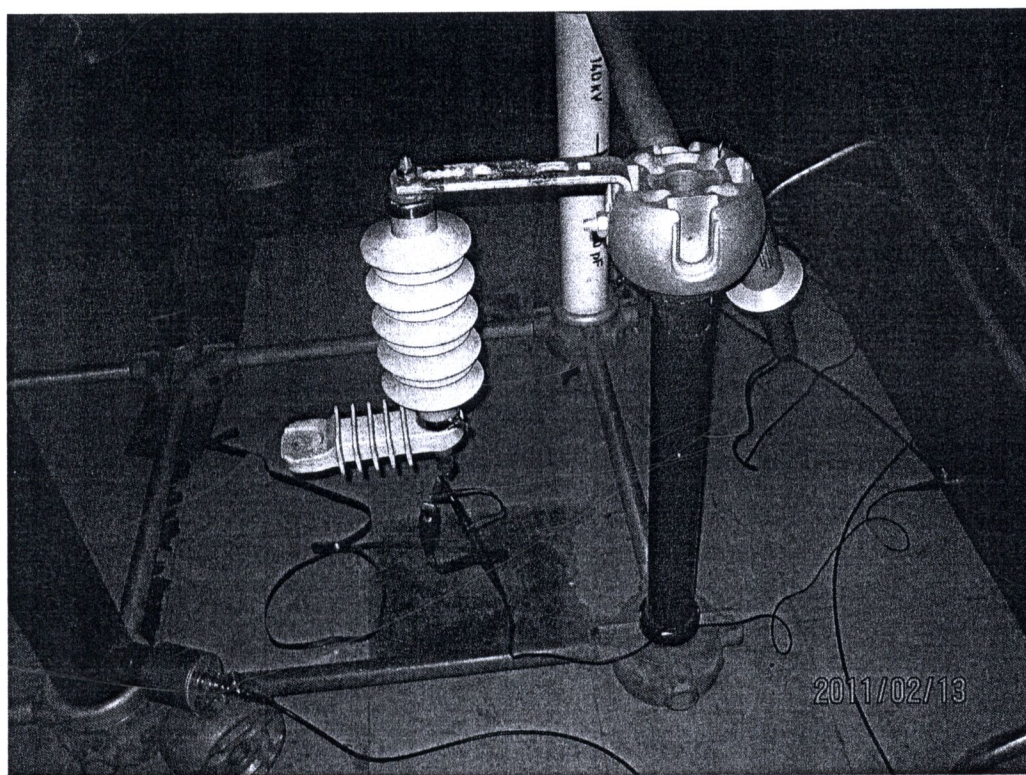
รูปภาพการวัดค่ากระแสรั่วไหลของกับดักเสร็จตัวอย่าง
ในห้องปฏิบัติการ



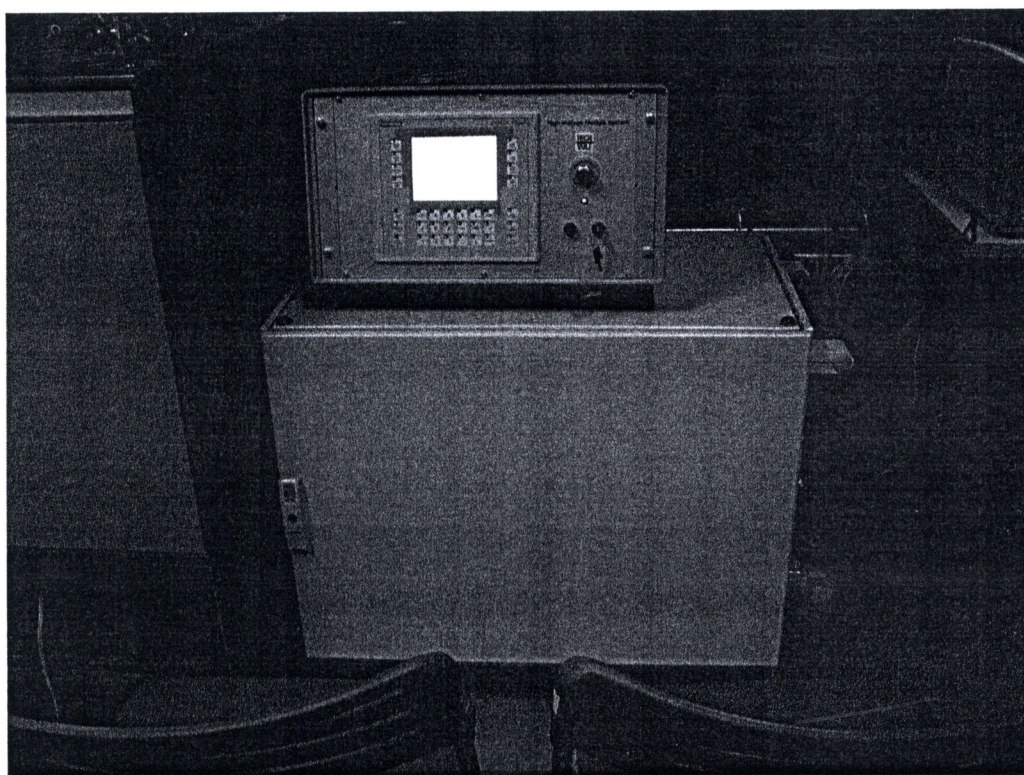
รูปที่ ค.1 การทดสอบวัดกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ



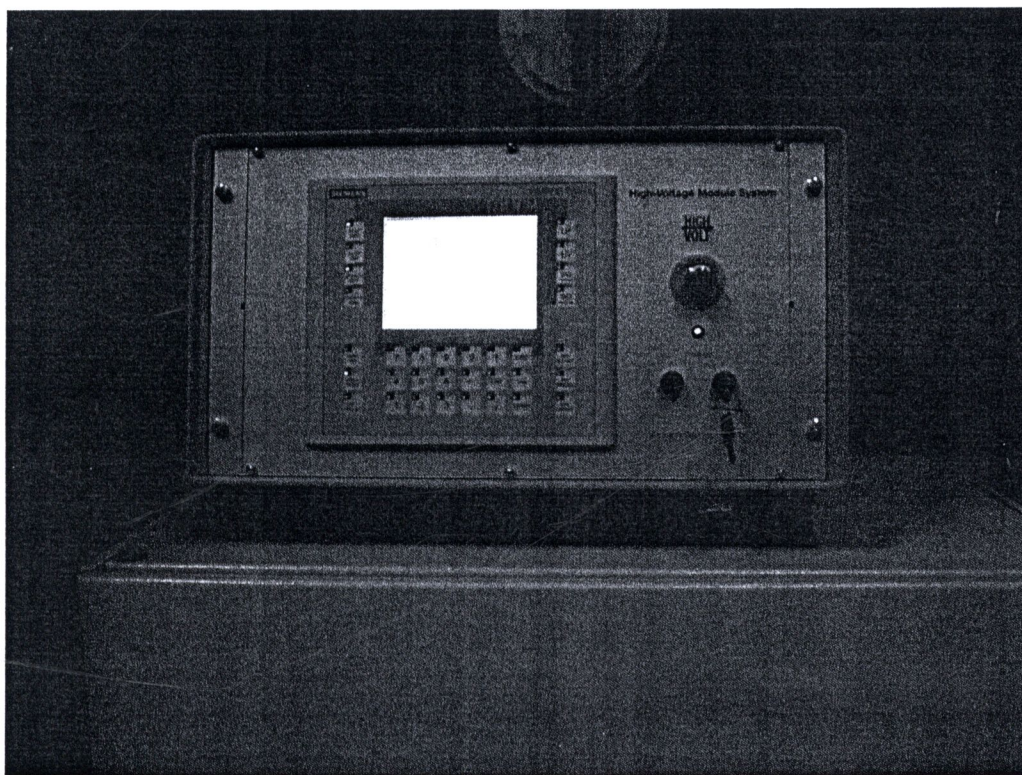
รูปที่ ค.2 การทดสอบวัดกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ



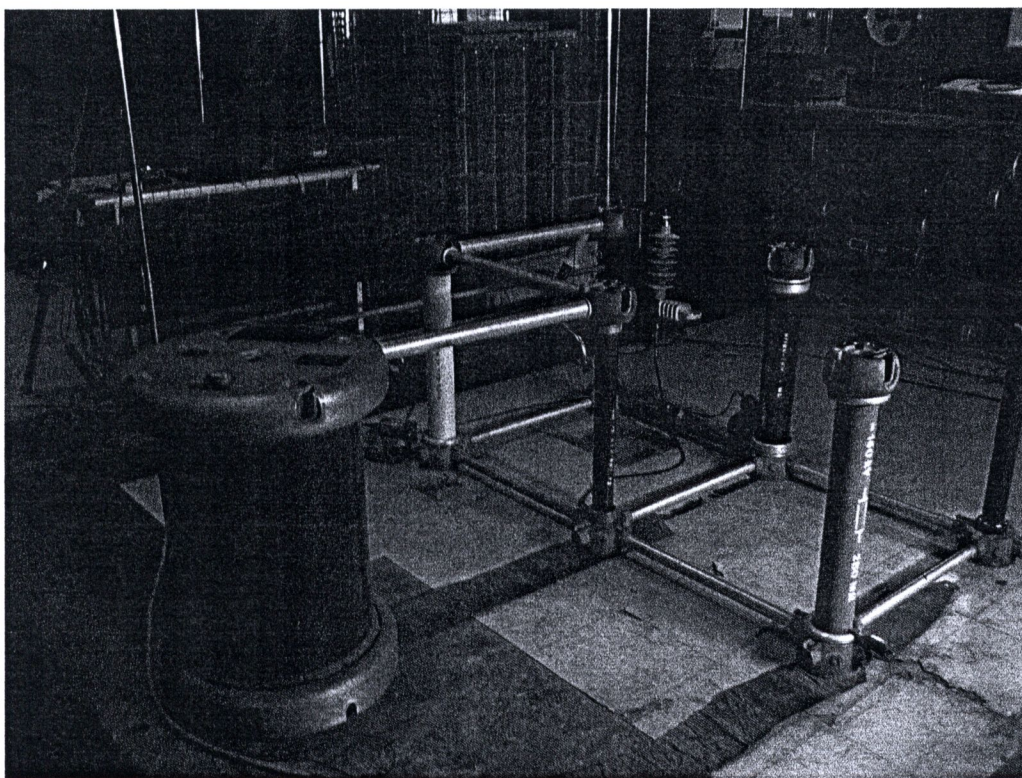
รูปที่ ค.3 การทดสอบวัดกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ



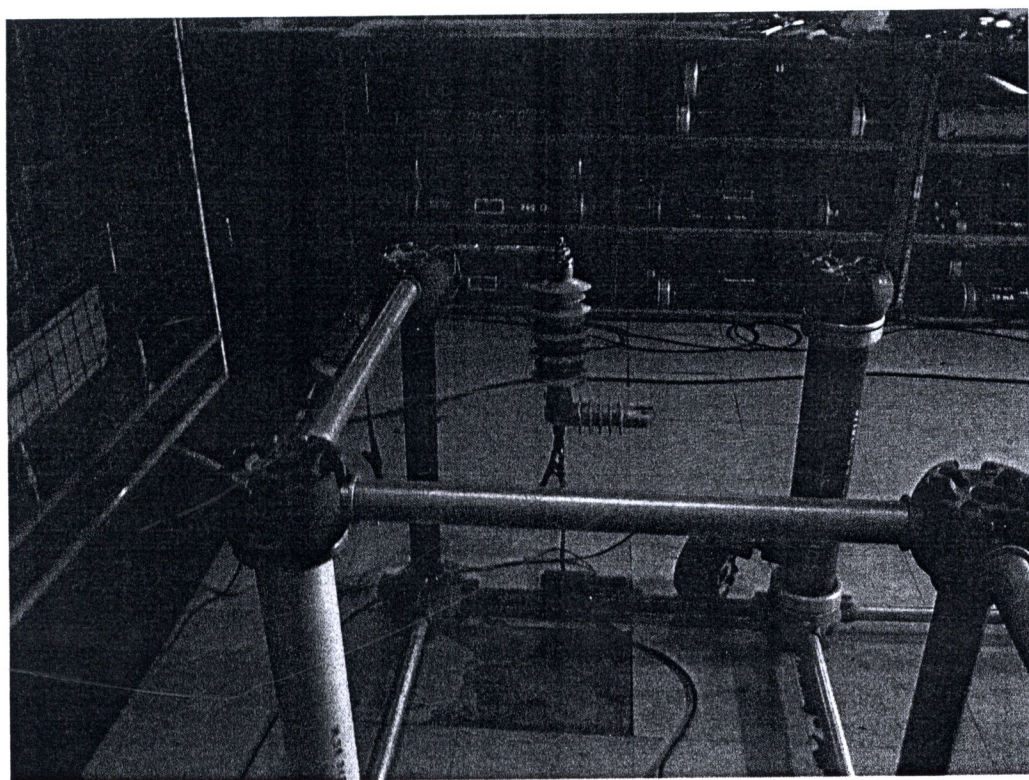
รูปที่ ค.4 การทดสอบวัดกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ



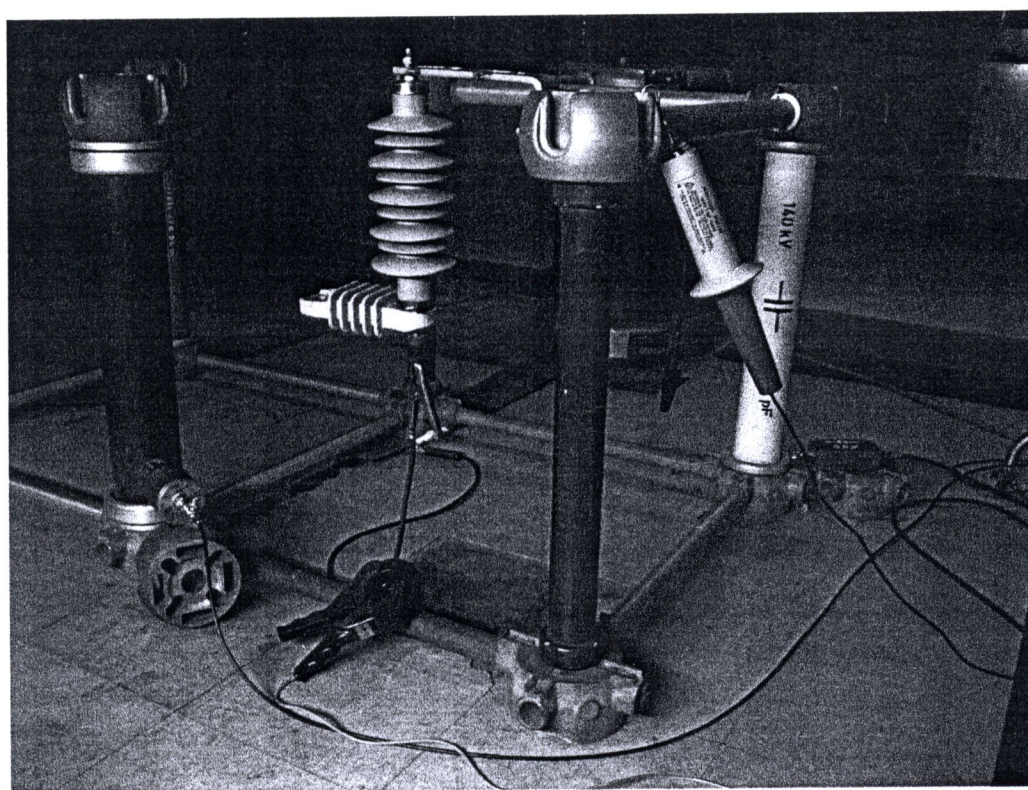
รูปที่ ค.5 ชุดควบคุมแรงดันทดสอบด้านแรงต่ำ



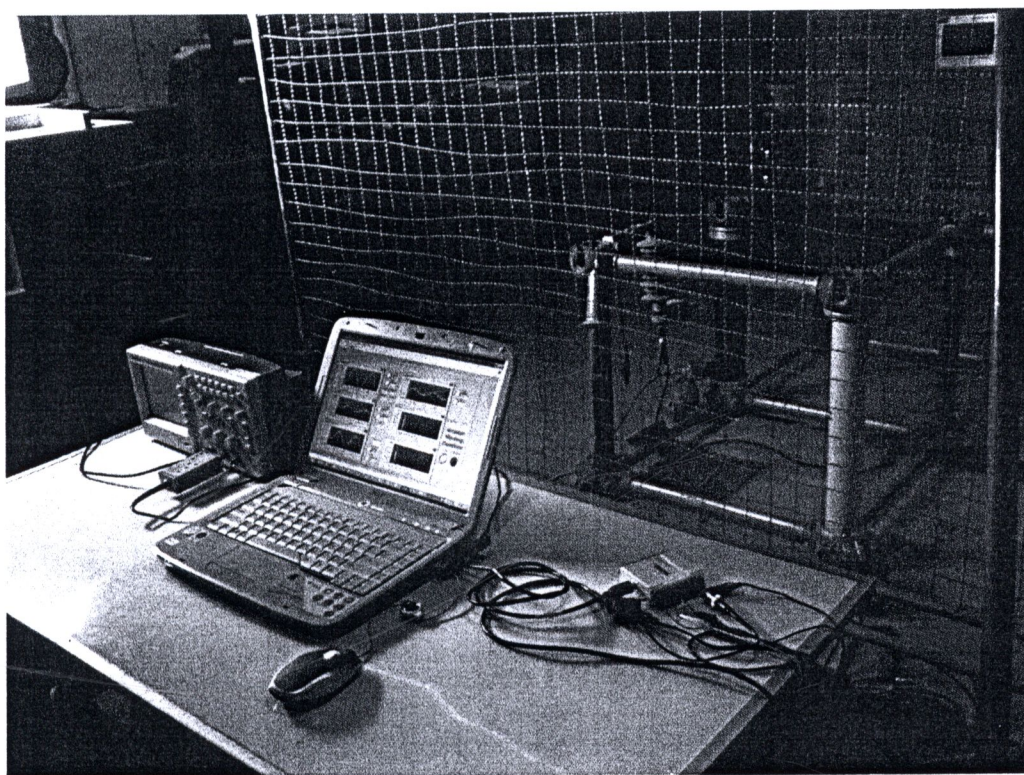
รูปที่ ค.6 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริมต้นแบบ



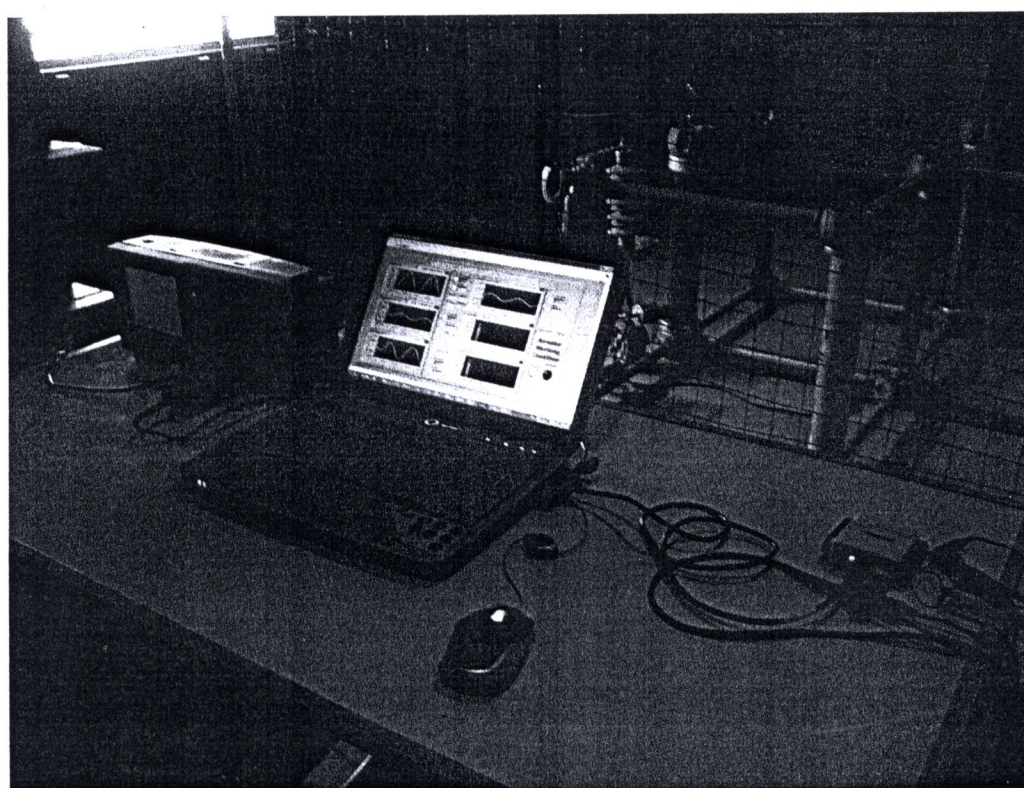
รูปที่ ค.7 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จต้นแบบ



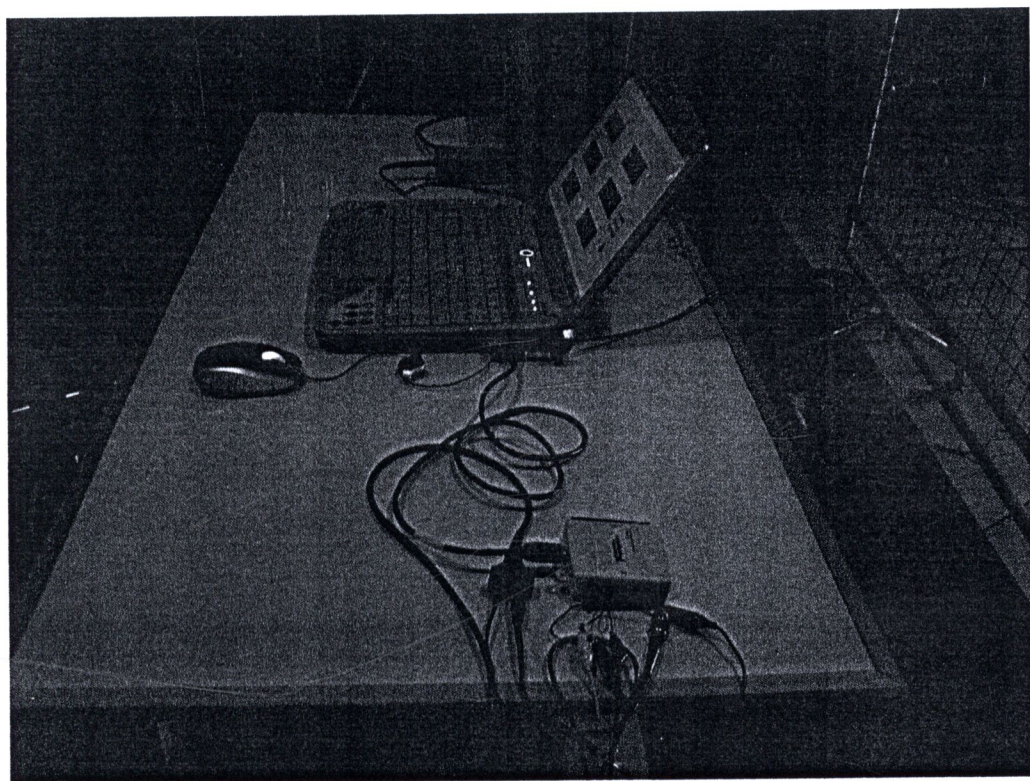
รูปที่ ค.8 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จต้นแบบ



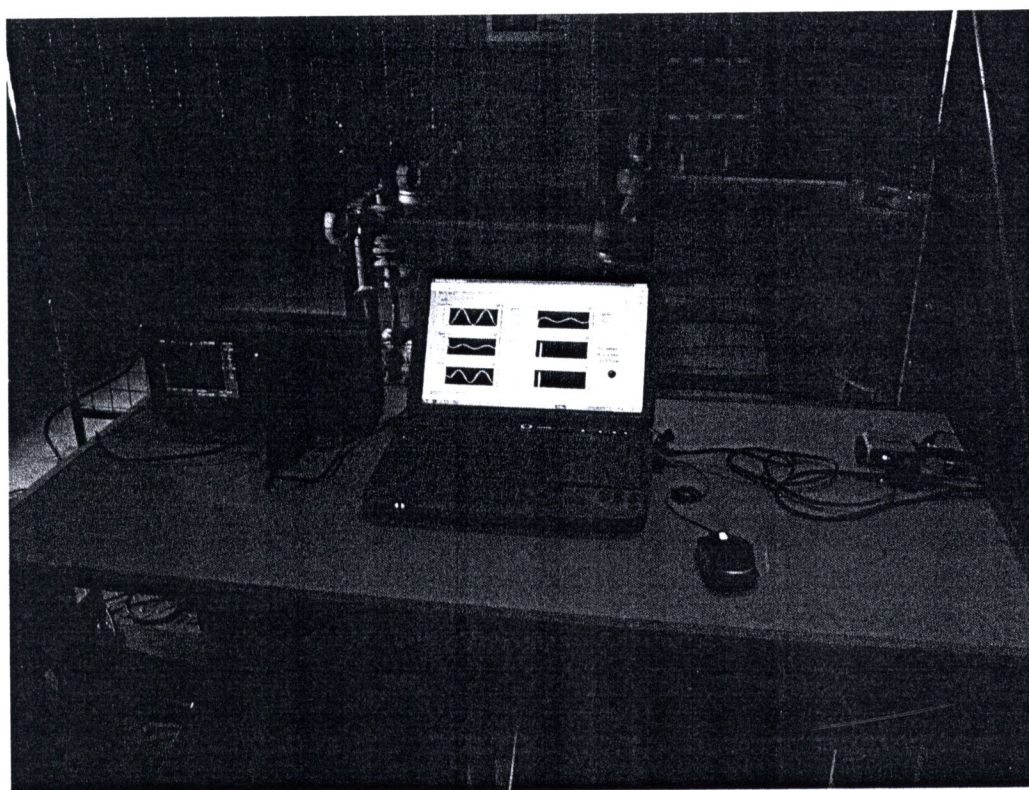
รูปที่ ค.9 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเล็รจตันแบบ



รูปที่ ค.10 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเล็รจตันแบบ



รูปที่ ค.11 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จต้นแบบ



รูปที่ ค.12 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จต้นแบบ

ภาคผนวก ง
ข้อมูลทางเทคนิค

3.1 Surge Arrester Block ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

SimPowerSystems

Surge Arrester

Implement metal-oxide surge arrester

Library

Elements

Description

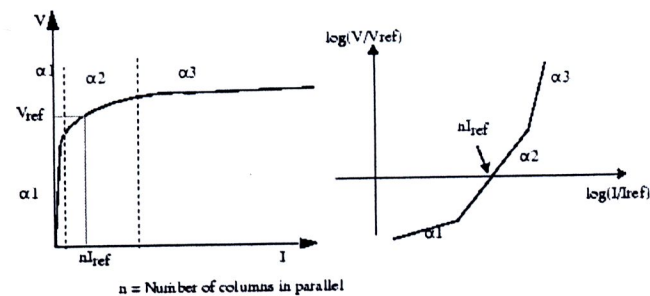


The Surge Arrester block implements a highly nonlinear resistor used to protect power equipment against overvoltages. For applications requiring high power dissipation, several columns of metal-oxide discs are connected in parallel inside the same porcelain housing. The nonlinear V-I characteristic of each column of the surge arrester is modeled by a combination of three exponential functions of the form

$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i}$$

The protection voltage obtained with a single column is specified at a reference current (usually 500 A or 1 kA). Default parameters k and α given in the dialog box fit the average V-I characteristic provided by the main metal-oxide arrester manufacturers and they do not change with the protection voltage. The required protection voltage is obtained by adding discs of zinc oxide in series in each column.

This V-I characteristic is graphically represented as follows (on a linear scale and on a logarithmic scale).



Dialog Box and Parameters

Block Parameters: Surge Arrester

Surge Arrester (mask)

Implements a metal-oxide surge arrester.

Parameters

Protection voltage Vref(V):
500e+03

Number of columns:
2

Reference current per column Iref(A):
500

Segment 1 characteristics [k1 alpha1]
[.955 50]

Segment 2 characteristics [k2 alpha2]
[1.0 25]

Segment 3 characteristics [k3 alpha3]
[.9915 16.5]

Measurements: None

☐ Show additional parameters

OK Cancel Help Apply



- Protection voltage Vref**
The protection voltage of the Surge Arrester block, in volts (V).
- Number of columns**
The number of metal-oxide disc columns. The minimum is one.
- Reference current per column Iref**
The reference current of one column used to specify the protection voltage, in amperes (A).

Segment 1 characteristics

The k and α parameters of segment 1.

Segment 2 characteristics

The k and α parameters of segment 2.

Segment 3 characteristics

The k and α characteristics of segment 3.

Measurements

Select **Branch voltage** to measure the voltage across the Surge Arrester block terminals.

Select **Branch current** to measure the current flowing through the Surge Arrester block.

Select **Branch voltage and current** to measure the surge arrester voltage and current.

Place a Multimeter block in your model to display the selected measurements during the simulation. In the **Available Measurements** list box of the Multimeter block, the measurement is identified by a label followed by the block name.

Measurement	Label
Branch voltage	Ub :
Branch current	Ib :

Limitations

The Surge Arrester block is modeled as a current source driven by the voltage appearing across its terminals. Therefore, it cannot be connected in series with an inductor or another current source. As the Surge Arrester block is highly nonlinear, a stiff integrator algorithm must be used to simulate the circuit. Ode23t with default parameters usually gives the best simulation speed. For continuous simulation, in order to avoid an algebraic loop, the voltage applied to the nonlinear resistance is filtered by a first-order filter with a time constant of 0.01 microseconds. This very fast time constant does not significantly affect the result accuracy.

When you use the Surge Arrester block in a discrete system, you will get an algebraic loop. This algebraic loop, which is required in most cases to get an accurate solution, tends to slow down the simulation. However, to speed up the simulation, in some circumstances, you can disable the algebraic loop by checking **Show additional parameters** and then **Break algebraic loop in discrete model**. You should be aware that disabling the algebraic loop introduces a one simulation step time delay in the model. This can cause numerical oscillations if the sample time is too large.

3.2 RLC ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

SimPowerSystems
Series RLC Branch
Implement series RLC branch

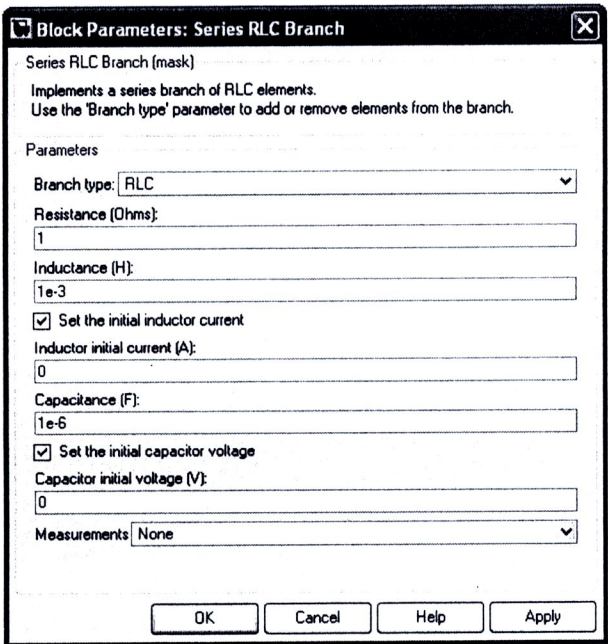
Library
Elements

Description


The Series RLC Branch block implements a single resistor, inductor, or capacitor, or a series combination of these. To eliminate either the resistance, inductance, or capacitance of the branch, the R, L, and C values must be set respectively to 0, 0, and infinity (1/nf). Only existing elements are displayed in the block icon.

Negative values are allowed for resistance, inductance, and capacitance.

Dialog Box and Parameters



Branch type
Select the elements you want to include in the branch. The R letter defines the resistor, the L letter defines the inductor, and the C letter defines the capacitor.

Resistance
The branch resistance, in ohms (Ω). The **Resistance** parameter is not visible if the resistor element is not specified in the **Branch type** parameter.

Inductance L
The branch inductance, in henries (H). The **Inductance** parameter is not visible if the inductor element is not specified in the **Branch type** parameter.

Set the initial inductor current
If selected, the initial inductor current is defined by the **Inductor initial current** parameter. If not selected, SimPowerSystems calculates the initial inductor current in order to start the simulation steady-state.

The **Set the initial inductor current** parameter is not visible and have no effect on the block if the inductor element is not specified in the **Branch type** parameter.

Inductor initial current (A)
The initial inductor current used at the start of the simulation. The **Inductor initial current** parameter is not visible and have no effect on the block if the inductor is not modeled and if the **Set the initial inductor current** parameter is not selected.

Capacitance C

The branch capacitance, in farads (F). The **Capacitance** parameter is not visible if the capacitance element is not specified in the **Branch type** parameter.

Set the initial capacitor voltage

If selected, the initial capacitor voltage is defined by the **Capacitor initial voltage** parameter. If not selected, SimPowerSystems calculates the initial capacitor voltage in order to start the simulation in steady-state.

The **Set the initial capacitor voltage** parameter is not visible and have no effect on the block if the capacitor element is not specified in the **Branch type** parameter.

Capacitor initial voltage (V)

The initial capacitor voltage used at the start of the simulation. The **Capacitor initial voltage** parameter is not visible and have no effect on the block if the capacitor is not modeled and if the **Set the initial capacitor voltage** parameter is not selected.

Measurements

Select **Branch voltage** to measure the voltage across the Series RLC Branch block terminals.

Select **Branch current** to measure the current flowing through the Series RLC Branch block.

Select **Branch voltage and current** to measure the voltage and the current of the Series RLC Branch block.

Place a Multimeter block in your model to display the selected measurements during the simulation. In the **Available Measurements** list box of the Multimeter block, the measurement is identified by a label followed by the block name.

Measurement	Label
Branch voltage	Ub :
Branch current	Ib :

3.3 Multifunction DAQ NI USB-6009



Technical Sales
Thailand
1800-345 555
asean@ni.com

NI USB-6009
14-Bit, 48 kS/s Low-Cost Multifunction DAQ

- 8 analog inputs (14-bit, 48 kS/s)
- 2 analog outputs (12-bit, 150 S/s); 12 digital I/O; 32-bit counter
- Bus-powered for high mobility; built-in signal connectivity
- OEM version available
- Compatible with LabVIEW, LabWindows/CVI, and Measurement Studio for Visual Studio .NET
- NI-DAQmx driver software and NI LabVIEW SignalExpress LE interactive data-logging software



Overview

The National Instruments USB-6009 provides basic data acquisition functionality for applications such as simple data logging, portable measurements, and academic lab experiments. It is affordable for student use and powerful enough for more sophisticated measurement applications. For Mac OS X and Linux users, download the NI-DAQmx Base driver software and program the USB-6009 with LabVIEW or C.

To supplement simulation, measurement, and automation theory courses with practical experiments, NI developed a USB-6009 Student Kit that includes a copy of the LabVIEW Student Edition. These kits are exclusively for students, giving them a powerful, low-cost, hands-on learning tool. Visit the NI academic products page at <http://www.ni.com/academic/measurements.htm> for more details.

For faster sampling, more accurate measurements, calibration support, and higher channel count, consider the NI USB-6210 and NI USB-6211 high-performance USB data acquisition devices.

Every NI USB data acquisition device includes a copy of NI LabVIEW SignalExpress LE so you can quickly acquire, analyze, and present data without programming. In addition to LabVIEW SignalExpress, USB data acquisition modules are compatible with the following versions (or later) of NI application software – LabVIEW 7.x, LabWindows™/CVI 7.x, or Measurement Studio 7.x. USB data acquisition modules are also compatible with Visual Studio .NET, C/C++, and Visual Basic 6.

Specifications

Specifications Documents

- Specifications (3)
- Data Sheet

Specifications Summary

General

Product Name	USB-6009
--------------	----------

Product Family	Multifunction Data Acquisition
Form Factor	USB
Part Number	779026-01
Operating System/Target	Pocket PC , Windows , Linux , Mac OS
DAQ Product Family	B Series
Measurement Type	Voltage
RoHS Compliant	Yes
Analog Input	
Channels	4 , 8
Single-Ended Channels	8
Differential Channels	4
Resolution	14 bits
Sample Rate	48 kS/s
Throughput (All Channels)	48 kS/s
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	138 mV
Minimum Voltage Range	-1 V , 1 V
Minimum Voltage Range Accuracy	37.5 mV
Number of Ranges	8
Simultaneous Sampling	No
On-Board Memory	512 B
Analog Output	
Channels	2
Resolution	12 bits
Max Voltage	5 V
Maximum Voltage Range	0 V , 5 V
Maximum Voltage Range Accuracy	7 mV
Minimum Voltage Range	0 V , 5 V
Minimum Voltage Range Accuracy	7 mV
Update Rate	150 S/s

Current Drive Single	5 mA
Current Drive All	10 mA
Digital I/O	
Bidirectional Channels	12
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Number of Channels	0 , 12
Timing	Software
Logic Levels	TTL
Input Current Flow	Sourcing , Sinking
Output Current Flow	Sinking , Sourcing
Programmable Input Filters	No
Supports Programmable Power-Up States?	No
Current Drive Single	8.5 mA
Current Drive All	102 mA
Watchdog Timer	No
Supports Handshaking I/O?	No
Supports Pattern I/O?	No
Maximum Input Range	0 V , 5 V
Maximum Output Range	0 V , 5 V
Counter/Timers	
Counters	1
Buffered Operations	No
Debouncing/Glitch Removal	No
GPS Synchronization	No
Maximum Range	0 V , 5 V
Max Source Frequency	5 MHz
Minimum Input Pulse Width	100 ns
Pulse Generation	No
Resolution	32 bits
Timebase Stability	50 ppm

3.4 Current Clamp

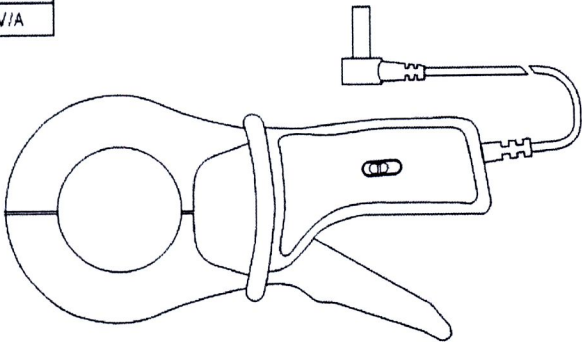
Current clamp for AC current
Model C173 (probe for leakage currents)

C100 series

Current	1 A	10 A	100 A	1000 A
Output	1 V/A	100 mV/A	10 mV/A	1 mV/A

■ Description

The C173 clamp measures leakage or differential currents from 1 mA upwards and can also be used with multimeters equipped with a range in mV AC.
The C173 clamp measures earth-loop currents and leakage currents. It also locates faults in circuits of single and three-phase networks.
For unearthed three-phase systems, use the optional Artificial Neutral.



■ Electrical specifications

Current calibres:
0.001 A AC ... 1.2 A AC
0.01 A AC ... 12 A AC
0.1 A AC ... 120 A AC
1 A AC ... 1200 A AC

Output signal:
1 VAC/AAC (1 V for 1 A)
100 mVAC/AAC (1 V for 10 A)
10 mVAC/AAC (1 V for 100 A)
1 mVAC/AAC (1 V for 1000 A)

Accuracy and phase shift ⁽¹⁾:

■ 1 A calibre

Primary current	0.001 A...0.01 A	0.01 A...0.1 A	0.1 A...1 A	1 A...1.2 A
% Accuracy of output signal	≤ 3 % + 1 mV	≤ 3 % + 1 mV	≤ 0.7 % + 1 mV	≤ 0.7 % + 1 mV
Phase shift	not specified	not specified	≤ 10°	≤ 10°

■ 10 A calibre

Primary current	0.01 A...0.1 A	0.1 A...1 A	1 A...10 A	10 A...12 A
Accuracy in % of output signal	≤ 1 % + 0.2 mV	≤ 0.5 % + 0.2 mV	≤ 0.5 %	≤ 0.5 %
Phase shift	not specified	≤ 5°	≤ 2°	≤ 2°

■ 100 A calibre

Primary current	0.1 A...1 A	1 A...10 A	10 A...100 A	100 A...120 A
Accuracy in % of output signal	≤ 1 % + 0.2 mV	≤ 0.5 % + 0.2 mV	≤ 0.3 %	≤ 0.2 %
Phase shift	not specified	≤ 2°	≤ 1°	≤ 1°

■ 1000 A calibre

Primary current	1 A...10 A	10 A...100 A	100 A...1000 A	1000 A...1200 A
% Accuracy of output signal	≤ 1 % + 0.2 mV	≤ 0.5 % + 0.2 mV	≤ 0.2 %	≤ 0.2 %
Phase shift	not specified	≤ 2°	≤ 1°	≤ 1°

Bandwidth:
10 Hz ... 3 kHz

Crest factor:

- 1 A calibre:
≤ 3 for I ≤ 3 A peak (1 Arms)
- 10 A calibre:
≤ 3 for I ≤ 30 A peak (10 Arms)
- 100 A calibre:
≤ 3 for I ≤ 300 A peak (100 Arms)
- 1000 A calibre:
≤ 3 for I ≤ 1700 A peak (500 Arms)

Maximum currents:

1000 A continuous for a frequency ≤ 500 Hz
(limitation proportional to the inverse of 1/2 of frequency beyond)

Load impedance:
≥ 10 MΩ and ≤ 47 pF

Output impedance:

- 1 A calibre: 10 kΩ ± 10 %
- 10 A calibre: 1 kΩ ± 10 %
- 100 A calibre: 100 Ω ± 10 %
- 1000 A calibre: 100 Ω ± 10 %

Operating voltage:
600 Vrms

Common mode voltage:
600 V category III and pollution degree 2

Influence of adjacent conductor:
≤ 1 mA/A at 50 Hz

Influence of conductor position in jaws:
≤ 0.3 % of output signal for frequencies ≤ 400 Hz

Influence of frequency ⁽²⁾:

- 1 A calibre:
< 2 % of output signal 30 Hz ... 48 Hz and 65 Hz ... 1 kHz
< 10 % of output signal 1 kHz ... 3 kHz
- 10 A calibre:
< 2 % of output signal 10 Hz ... 48 Hz and 65 Hz ... 3 kHz
- 100 A calibre:
< 1.5 % of output signal 10 Hz ... 48 Hz and 65 Hz ... 3 kHz
- 1000 A calibre:
< 1 % of output signal 10 Hz ... 48 Hz and 65 Hz ... 1 kHz

Influence of crest factor:
≤ 0.5 % for crest factor limited to 3

Influence of DC current superimposed on rated current:
≤ 10 % at 1000 A for a DC current of 10 A

Current clamp for AC current
Model C173 (probe for leakage currents)

Mechanical specifications

Operating temperature:
-10 °C ... +50 °C

Storage temperature:
-40 °C ... +70 °C

Influence of temperature:
≤ 0.15 % of output signal per 10 °K from -10 °C ... +40 °C
≤ 0.2 % of output signal per 10 °K from +40 °C ... +50 °C

Relative humidity for operation:
0 ... 85 % RH with a linear decrease above 35 °C

Influence of relative humidity:
< 0.1 % of output signal from 10 % to 85 % RH

Operating altitude:
0 to 2,000 m

Max. jaw opening:
53 mm

Patented progressive opening system

Clamping capacity:
Cable: Ø max 52 mm
Busbar: 1 busbar of 50 x 5 mm or 4 busbars of 30 x 5 mm

Casing protection rating:
IP40 (IEC 529)

Drop test:
1 m (IEC 68-2-32)

Shock resistance:
100 g (IEC 68-2-27)

Vibration resistance:
5/15 Hz 1.5 mm
15/25 Hz 1 mm
25/55 Hz 0.25 mm (IEC 68-2-6)

Self-extinguishing capability:
UL94 V0

Dimensions:
216 x 111 x 45 mm

Weight:
550 g

Colours:
Dark grey case with red jaws

Output:
1.5 m two-wire lead with double or reinforced insulation terminated by 2 elbowed male safety plugs (4 mm)

Safety specifications

Electrical safety:
Instrument with double insulation or reinforced insulation between the primary, the secondary and the grippable part located under the guard as per IEC 1010-1 & IEC 1010-2-032

- 600 V category III, pollution degree 2
- 300 V category IV, pollution degree 2

Electromagnetic compatibility (EMC):
EN 50081-1: class B
EN 50082-2:

- Electrostatic discharge: IEC 1000-4-2
- Radiated field: IEC 1000-4-3
- Fast transients: IEC 1000-4-4
- Magnetic field at 50/60 Hz: IEC 1000-4-8

(1) Conditions of reference: 23 °C ± 3 °K, 20 % to 75 % RH, sine signal, frequency of 48 Hz to 65 Hz, distortion factor < 1 %, no DC components, external magnetic field < 40 A/m, no AC magnetic field, conductor centred for measurement, load impedance: ≥ 10 MΩ and ≤ 47 pF

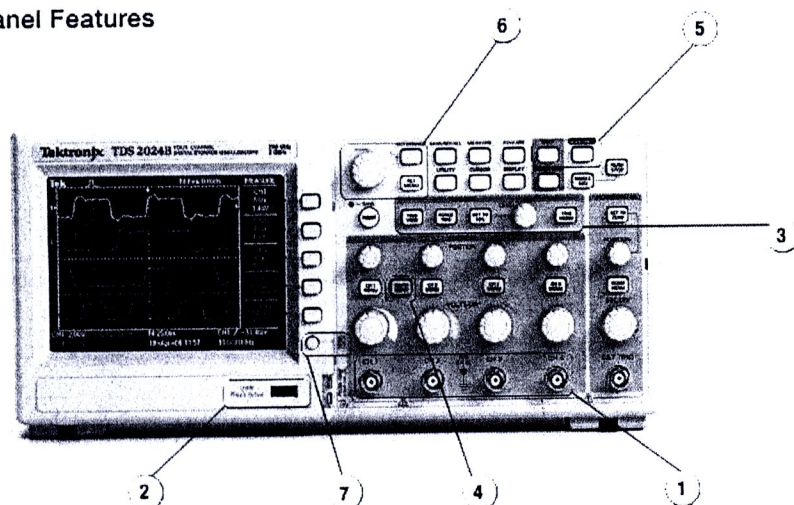
(2) Out of reference domain

To order	Reference
AC current clamp model C173 with operating manual	P01120309
Accessory: AN1 artificial neutral box (see chapter 12)	P01197201
Bag n°11	P01100120

3.5 Digital Storage Scope Tektronix model TDS 2002B

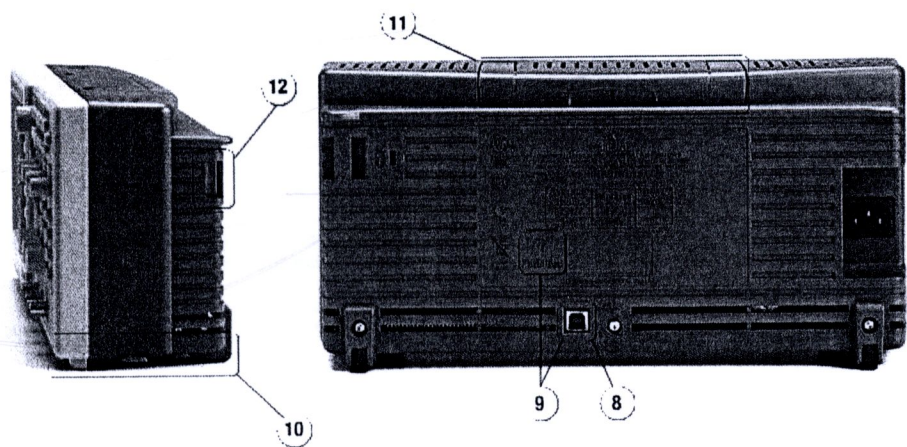
Digital Storage Oscilloscopes
► TDS1000B Series • TDS2000B Series

► Front Panel Features



- 1 **Digital Real-Time Technology** – Quickly debug and characterize a wide range of signal types on four channels simultaneously with Tektronix' unique digital real-time (DRT) sampling technology. This acquisition technology allows you to capture high-frequency, non-repetitive information, such as glitches and edge anomalies, that eludes other oscilloscopes in its class.
- 2 **USB Host Port** – Conveniently use your USB flash drive to store your personal oscilloscope setups, screen shots, and waveform data for later use. Also use the USB host port to easily update your instrument firmware.
- 3 **Advanced Triggers** – Quickly capture your event of interest with advanced triggers including pulse width and line selectable video triggers.
- 4 **Easy and Precise On-board Analysis** – Fast Fourier Transform (FFT) and waveform add, subtract and multiply math functions come standard on all models. FFT function displays frequency domain spectrums for fast harmonic distortion analysis or other frequency based analysis.
- 5 **Simple Setup and Operation** – Simplify setup with smart Autoset function which identifies the type of waveform, adjusts controls to produce a usable display of the input signal, and allows you to select how the waveform should be presented (for example, single versus multiple cycles).
Built-in context-sensitive help further eases the operation by providing indexed and linked topics that allow you to selectively learn about the operation of various oscilloscope features and functions. Help is provided in the same languages as the user interface.
- 6 **Simple User Interface** – The most frequently used functions are brought forth to the panel for direct accessibility (for example, single sequence button, print button and default setup button).
Dedicated reference button allows you to quickly recall your "golden" waveform for quick comparisons.
Autorange function automatically scales each waveform as you move your probe from test point to test point.
- 7 **Probe Check Wizard** – Quickly verify that your probe is calibrated and operating properly.

► Side and Rear Panel Features



- 8 USB Device Port Combined with OpenChoice® and NI SignalExpress® TE for Seamless PC Connectivity** – Easily communicate with other instruments, peripherals or systems via USB or GPIB (optional). The USB device port allows you full programmable control for automated measurements and remote display and archiving.
- For seamless integration to your PC without programming, OpenChoice PC communications software and NI SignalExpress TE interactive measurement software enable transferring of waveform data, screen images and front panel setups between the oscilloscope and the PC. Both allow you to transfer your data into a stand-alone desktop application, Microsoft Word or Microsoft Excel. NI SignalExpress TE software provides extended capabilities, including advanced analysis, remote oscilloscope control and live waveform analysis.
- 9 USB Device Port Combined with PictBridge® for Direct Print** – Directly print your screen image to any PictBridge compatible printer via the USB device port. Each image can be stamped with date, time and instrument model and serial number (if supported by printer).
- 10 Compact 124.2 mm (4.8 in) Depth** – Free up valuable space on your bench or desktop.
- 11 Integrated Handle** – Easily carry your ultra-lightweight (2.0 kg [4.4 lb]) portable instrument into the field or to another room on a different floor of your building.
- 12 Integrated Security Loop and Kensington Lock** – If necessary, secure your oscilloscope in place. Security slots connect to Kensington lock or allow cable to pass through.

Digital Storage Oscilloscopes
 ▶ TDS1000B Series • TDS2000B Series

▶ TDS1000B and TDS2000B Series Digital Storage Oscilloscopes (continued)									
	TDS1001B	TDS1002B	TDS1012B	TDS2002B	TDS2004B	TDS2012B	TDS2014B	TDS2022B	TDS2024B
DC Vertical Accuracy	+3% on all models								
Vertical Zoom	Vertically expand or compress a live or stopped waveform								
Maximum Input Voltage	300V _{RMS} CAT II; derated at 20 dB/decade above 100 kHz to 13V _{peak} AC at 3 MHz								
Position Range	2 mV to 200 mV/div +2 V; >200 mV to 5 V/div +50 V								
Bandwidth Limit	20 MHz for all models								
Input Coupling	AC, DC, GND on all models								
Input Impedance	1 MΩ in parallel with 20pF								
Time Base Range	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	2.5 ns to 50 sec/div	2.5 ns to 50 sec/div
Time Base Accuracy	50 ppm								
Horizontal Zoom	Horizontally expand or compress a live or stopped waveform								
I/O Interfaces									
USB Ports	Included on all models: 2 USB 2.0 Ports USB host port on front panel supports USB flash drives USB device port on back of instrument supports connection to PC and all PictBridge compatible printers								
GPIO	Optional								
Non-volatile Storage									
Reference Waveform Display	(2) 2.5 K point reference waveforms								
Waveform Storage w/o USB Flash Drive	(2) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(4) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(4) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(4) 2.5 K point
Waveform Storage with USB Flash Drive	96 or more reference waveforms per 8 MB								
Setups w/o USB Flash Drive	10 front panel setups								
Setups with USB Flash Drive	4000 or more front panel setups per 8 MB								
Screen Images with USB Flash Drive	128 or more screen images per 8 MB (the number of images depends on file format selected)								
Save All with USB Flash Drive	12 or more Save All operations per 8 MB A single Save All operation creates 3 to 9 files (setup, image, plus one file for each displayed waveform)								

Digital Storage Oscilloscopes
► TDS1000B Series • TDS2000B Series

Acquisition Modes

Peak Detect –

High frequency and random glitch capture. Captures glitches as narrow as 12 ns (typical) using acquisition hardware at all time base settings from 5 μ s/div to 50 s/div.

Sample – Sample data only.

Average –

Waveform averaged, selectable: 4, 16, 64, 128.

Single Sequence –

Use the Single Sequence button to capture a single triggered acquisition sequence at a time.

Roll Mode –

At acquisition time base settings of >100 ms/div.

Trigger System

Trigger Modes – Auto, Normal, Single Sequence.

Trigger Types

Edge (Rising/Falling) –

Conventional level-driven trigger. Positive or negative slope on any channel. Coupling selections: AC, DC, Noise Reject, HF Reject, LF Reject.

Video –

Trigger on all lines or individual lines, odd/even or all fields from composite video, or broadcast standards (NTSC, PAL, SECAM).

Pulse Width (or Glitch) –

Trigger on a pulse width less than, greater than, equal to, or not equal to, a selectable time limit ranging from 33 ns to 10 s.

Trigger Source

2-channel Models – CH1, CH2, Ext, Ext/S, AC Line.

4-channel Models –

CH1, CH2, CH3, CH4, Ext, Ext/S, AC Line.

Trigger View

Displays trigger signal while trigger view button is depressed.

Trigger Signal Frequency Readout

Provides a frequency readout of the trigger source.

Cursors

Types – Amplitude, Time.

Measurements – Δ T, Δ f (frequency), Δ V.

► Autoset Menu

Single-button, automatic setup of all channels for vertical, horizontal and trigger systems, with undo Autoset.

Signal Type	Autoset Menu Choices
Square Wave	Single-cycle, Multi-cycle, Rising or Falling Edge
Sine Wave	Single-cycle, Multi-cycle, FFT Spectrum
Video (NTSC, PAL, SECAM)	Field: All, Odd or Even Line: All or Selectable Line Number

Automatic Waveform Measurements

Period, Frequency, $\pm$ Width, $\pm$ Width, Rise Time, Fall Time, Max, Min, Peak-to-Peak, Mean, Cycle RMS.

Waveform Math

Operators – Add, Subtract, Multiply, FFT.

FFT –

Windows, Hanning, Flat Top, Rectangular.
2048 sample points.

Sources –

2-channel Models: CH1 to CH2, CH2 to CH1.

CH1+CH2, CH1xCH2.

4-channel Models: CH1 to CH2, CH2 to CH1.

CH3 to CH4, CH4 to CH3, CH1+CH2, CH3+CH4,

CH1xCH2, CH3xCH4.

Autorange

Automatically adjust vertical and/or horizontal oscilloscope settings when probe is moved from point to point, or when the signal exhibits large changes.

Display Characteristics

Display –

Color models: 4 VGA passive color LCD with color on black background with adjustable multi-level contrast.
Monochrome models: 4 VGA backlit passive LCD with adjustable multi-level contrast and inverse video selectable from front panel.

Interpolation – Sinc(x).

Display Types – Dots, vectors.

Persistence – Off, 1 s, 2 s, 5 s, infinite.

Format – YT and XY.

Environmental and Safety

Temperature –

Operating: 0 °C to +50 °C.

Non-operating: –40 °C to +71 °C.

Humidity –

Operating and Non-operating: Up to 80% RH at or below +40 °C. Operating and Non-operating: Up to 45% RH up to +50 °C.

Altitude –

Operating and Non-operating: Up to 3,000 m.

Electromagnetic Compatibility –

Meets Directive 89/336/EEC, amended by 93/68/EEC, meets or exceeds EN55011 Class A Radiated and Conducted Emissions; FCC 47 CFR, Part 15, Subpart B, Class A; Australian EMC Framework, demonstrated per Emission Standard AS/NZS 2064; Russian GOST EMC regulations.

Safety –

UL61010-1:2003, CSA22.2 No. 61010-1:2003, EN61010-1:2001, IEC61010-1:2001.

Physical Characteristics

Instrument Dimensions	mm	in.
Width	326.3	12.85
Height	158.0	6.22
Depth	124.2	4.89
Weight	kg	lbs.
Instrument only	2.0	4.4
With accessories	2.2	4.9

Instrument Shipping

Package Dimensions	mm	in.
Width	476.2	18.75
Height	266.7	10.5
Depth	228.6	9

RM2000B Rackmount	mm	in.
Width	482.6	19
Height	177.8	7
Depth	108	4.25

3.6 Digital Multimeter Tektronix model DMM916



DMM916 / DMM914 / DMM912.

Handheld Digital Multimeters

DMM916 * DMM914 * DMM912

This product is no longer carried in our catalog.

Characteristics

	DMM916	DMM914	DMM912
Display Range (Selectable)	40,000 and 4,000	40,000 and 4,000	40,000 and 4,000
Display Update Rate (Selectable)	1/s to 4/s	1/s to 4/s	1/s to 4/s
Analog Bar Graph Update Rate	20/s	20/s	20/s
DC Voltage Ranges (Full Scale)*1	400.00 mV, 4.0000 V, 40.000 V, 400.00 V, 1,000.0 V		
-- Best Accuracy*2	0.06% + 1 ct	0.10% + 1 ct	0.20% + 1 ct
AC Voltage Ranges, rms (Full Scale)*1	4.0000 V, 40.000 V, 400.00 V, 750.0 V		
-- Best Accuracy*2	0.70% + 1 ct	0.80% + 1 ct	1.00% + 1 ct
-- Crest Factor	3	3	3
DC Current Ranges (Full Scale)*1	4,000.0 µA, 400.00 mA, 10.000 A		
-- Best Accuracy*2	0.30% + 1 ct	0.40% + 1 ct	0.50% + 1 ct
AC Current Ranges (Full Scale)*1	4,000.0 µA, 400.00 mA, 10.000 A		
-- Best Accuracy*2	0.90% + 8 cts	0.90% + 8 cts	1.20% + 8 cts
Resistance Ranges (Full Scale)*1	400.00 Ohm, 4.0000 kilohm, 40.000 kilohm, 400.00 kilohm, 4.0000 megaohm, 40.000 megaohm		
-- Best Accuracy*2	0.30% + 1 ct	0.40% + 1 ct	0.50% + 1 ct

	DMM916	DMM914	DMM912
Low-voltage Ohm Ranges (Full Scale)* ¹	4.000 kilohm, 40.00 kilohm, 400.0 kilohm, 4.000 megaohm, 40.00 megaohm		
-- Best Accuracy* ²	0.60% + 1 ct	0.80% + 1 ct	1.00% + 1 ct
Capacitance Ranges (Full Scale)* ¹	4.000 nF, 40.00 nF, 400.0 nF, 4.000 μ F, 40.00 μ F, 400.0 μ F, 4.000 mF, 40.00 mF		
-- Best Accuracy* ²	1.00% + 10 ct	1.00% + 10 ct	1.00% + 10 ct
Frequency Ranges (Full Scale)* ¹	400.00 Hz, 4.0000 kHz, 40.000 kHz, 400.00 kHz, 2.0000 MHz		
-- Best Accuracy* ²	0.01% + 1 ct	0.01% + 1 ct	0.01% + 1 ct
Temperature Range	-50°C to +980°C	-50°C to +980°C	
-- Best Accuracy (K-type)	2°C	2°C	

*¹ Full scale ranges listed are available on all three models.

*² Accuracies are listed in 4,000 ct mode, multiply counts by 10 in 40,000 count mode.

Product manufactured in ISO 9001 registered facilities



49A-10733-3p479, 06/1997, 09/01/1999



ประวัติคณะผู้วิจัย



วิจัย ผดุงศิลป์ : จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากวิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา พ.ศ. 2522 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2527 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งานวิจัยที่สนใจ คือ Power System Management, Power System Protection, High Voltage Engineering, Energy Conservation, Renewable Energy



พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล : จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2542 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2545 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2546 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งานวิจัยที่สนใจ คือ High Voltage Engineering, Electromagnetic Field, Electrical Safety

