



Abb. 2. Datenerfassung und Auswertung von numerischen Schutzgeräten

Sekundärtechnik beschränkt. Dieser Denkanatz schöpft aber die Möglichkeiten der modernen Technologie bei weitem nicht aus. Deshalb wird hier eine umfassende Definition eines Systems für die permanente Überwachung einer Schaltanlage vorgezogen:

Die permanente Überwachung (Online Monitoring) von Schaltanlagen umfasst die regelmäßige Bewertung des aktuellen Betriebszustands sowohl der Sekundärtechnik als auch der Primärtechnik, um die Gesamtkosten, bestehend aus der Summe aller Betriebs- und Wartungskosten, minimal zu halten.

Die hervorragende Flexibilität und der enorme Funktionsumfang von numerischen Schutzgeräten ermöglichen die Realisierung vieler Funktionen für die Zustandsüberwachung und Fehleranalyse, wie sequentielle Registrierung von Ereignissen, Aufzeichnungen von Störungen sowie die dynamische Anpassung an die aktuelle Situation im Netz. Die numerischen Schutzgeräte erfassen dauernd Daten über den Status des Prozesses und Informationen über den Betriebszustand (Abb. 2).

Die Daten werden entweder automatisch in gewissen Zeitintervallen oder auf Verlangen übermittelt. Die Werkzeuge für Fehlerauswertung und Problemdiagnose sind sehr bedienerfreundlich und erlauben zuverlässige Aussagen über Fehlerursache und Fehlerort, wenn es sich um Leitungsfehler han-

delt. Es können ferner Geräteparameter verifiziert und an sich ändernde Bedingungen im Netz angepasst werden, ohne dass man die Geräte vor Ort neu einstellen muss.

Die Fülle der Informationen kann entweder in Punkt-zu-Punkt-Verbindungen seriell übermittelt werden oder über ein Kommunikationsnetz (WAN).

7. Schlussfolgerung

Systeme für Stationsautomatisierung, bestehend aus numerischen Schutz- und Steuergeräten stellen eine Infrastruktur zur Verfügung, die einen neuen Ansatz für die Wartung und die Bewirtschaftung von Betriebsmitteln für Stromübertragung und -verteilung ermöglichen – als kosteneffiziente Lösung für

- Online Monitoring der Primär- und Sekundärtechnik von Schaltanlagen,
- Diagnosen zur Bestimmung des tatsächlichen Wartungsbedarfs,
- an der Zuverlässigkeit orientierte Wartung und Bewirtschaftung.

Der Anwendernutzen umfasst sowohl die Senkung der Gesamtkosten für Betrieb und Wartung als auch die Verbesserung der Qualität und Verfügbarkeit der Stromversorgung.

Power Quality (PQ) im Spannungsfeld von Kunde und ELU – ist PQ überhaupt noch verkaufbar?¹

H. Stigler ÖVE²

1. Einleitung

Die Power Quality (PQ) für die Versorgung stellte schon immer einen zentralen Gegenstand von elektrizitätswirtschaftli-

¹ Kurzfassung eines Vortrags, gehalten anlässlich der 39. Fachtagung der Österreichischen Gesellschaft für Energietechnik im ÖVE, die am 18. und 19. Oktober 2001 in Salzburg stattfindet.

² Univ.-Prof. Mag. rer. soc. oec. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinz Stigler, Institut für Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik, Abteilung für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18, A-8010 Graz.

cher Planung und Betrieb dar. Bereits 1965 beschäftigt sich Bauer [4] in seiner Habilitation über „Die Risiken in der Elektrizitätswirtschaft“ eingehend mit dem „wirtschaftlichen Schaden, der durch das Fehlen von elektrischer Energie entsteht“ und zeigt im Rahmen dieser Arbeit nach einer Quantifizierung des Schadens Ansätze zur Optimierung des Gesamtsystems Elektrizitätsversorgungsunternehmen – Kunde auf. Aber auch Marketingansätze für qualitätsdifferenzierten Stromverkauf wurden z. B. von Hamm [17] schon früh unternommen.

Grundlegende, frühe Arbeiten wurden von Munasinghe [29], Tollefson [36], Shephard [34], Arrillaga [2] und Meliopoulos [27] geleistet, an die Dugan [11] anschloss.

Heydt [19] vom Power Quality Center of Arizona State University definiert „Power Quality“ vor allem als Versorgung mit solchen Spannungen und Systemgestaltungen, dass der Nutzer die elektrische Energie vom Verteilungssystem erfolgreich ohne Störungen und Unterbrechungen nutzen kann. Die breitere Definition bezieht sich auf Systemzuverlässigkeit, Auswahl von Komponenten und Leitern, lang dauernde Ausfälle, Spannungsungleichgewichte in dreiphasigen Systemen, Leistungselektronik und deren Schnittstellen zur Stromversorgung und vieles andere mehr. Eine engere Definition zielt nur auf Verzerrungen der Wellenform. Die Hauptklassifizierung der Power Quality bezieht sich auf stationäre und transiente Problemstellungen.

2. Generelle Untersuchungen zur PQ für den Kundenbereich

Im letzten Jahrzehnt wurden international mehrere Arbeiten mit Bezug auf PQ für die Stromverbraucher unternommen und werden angesichts der Liberalisierung laufend verstärkt.

Sullivan [35] untersuchte für kanadische Kunden den Zusammenhang von Unterbrechungskosten und Kundenerwartungen bezüglich der Versorgungssicherheit und zeichnet folgendes Bild (siehe Tabelle 1):

Tabelle 1.

	Erzeugungsausfall		Übertragungs-, Verteilungsausfall	
	Kosten/Ausfall	Durchschnittskosten	Kosten/Ausfall	Durchschnittskosten
Haushalte	4,9 \$	1,9 \$/kWh	5,4 \$	2,1 \$/kWh
Gewerbe	604,2 \$	21,0 \$/kWh	1 317,2 \$	45,8 \$/kWh
Industrie	4 443,0 \$	3,6 \$/kWh	9 403,6 \$	7,6 \$/kWh
Gesamtkunden	n. a.	7,8 \$/kWh	n. a.	16,15 \$/kWh

Von grundsätzlicher Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, dass die Kosten einer vorangekündigten Unterbrechung nur etwa halb so hoch sind wie ohne Vorankündigung. Großkunden erwarten eine so gut wie unterbrechungsfreie Versorgung. Mittlere und kleinere Wirtschaftskunden haben einen deutlich höheren Versorgungssicherheitsanspruch als Haushaltskunden. Die Zufriedenheit der Haushalte hängt überraschenderweise nicht von der Versorgungshistorie ab, sondern vor allem von der aktuellen Versorgungsqualität.

3. Kosten fehlender PQ bei industriellen Kunden

Lamedica [23] weist in seiner aktuellen Industriestudie darauf hin, dass die laufende Zunahme der Automatisierung im industriellen Endverbrauch die Störanfälligkeit von Produktionsprozessen aufgrund von PQ-Störungen dramatisch erhöht. Dadurch werden für die Kunden zum Teil hohe Kosten durch Anlagenschäden, Produktionsverluste, Richtzeiten und Neustartkosten verursacht.

In dieser Befragung italienischer Industriebetriebe (Glas, Gummi, Plastik, Stromkabel, Elektroausrüstung, Papier,

Textilien, Schiffe, Eisenmetallurgie) ergibt sich von Kunden-seite folgende Klassifizierung von PQ-Störungen nach ihrer Auswirkung auf den Produktionsprozess:

– kurze Unterbrechung/Ausfall	49 %
– Mikro-Unterbrechungen	24 %
– Einsenkungen (sags)	11 %
– transiente Überspannungen	8 %
– Spannungsschwankungen	7 %
– Harmonische	1 %

Die Untersuchung der Unterbrechungen/Ausfälle – die den Großteil der PQ-Störungen auf sich vereinen – ergibt, dass sich diese mit folgenden Häufigkeiten ereignet haben (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2.

Unterbrechungen/Ausfälle					
< 5-mal	5–10-mal	> 10-mal	selten	manchmal	nie
Nennungshäufigkeit					
18 %	19 %	18 %	32 %	12 %	1 %

Hinsichtlich der maximal zulässigen Unterbrechungsdauer ohne gravierende Wirkungen ergibt sich folgendes Bild (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3.

maximal zulässige Ausfalldauer					
< 1 min	1–3 min	3–15 min	15–30 min	> 30 min	
Nennungshäufigkeit					
18 %	19 %	18 %	32 %	12 %	

Die Abschätzung der jährlichen Verlustkosten durch PQ-Störungen zeigt folgende Aufteilung (siehe Tabelle 4):

Tabelle 4.

vernachlässigbar	geschätzte Jahresverluste wegen PQ				
	minimal	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
Nennungshäufigkeit					
8 %	28 %	20 %	25 %	17 %	2 %

Wacker [37] fand für kanadische Betriebe für Unterbrechungsdauern zwischen einer Minute und acht Stunden einen deutlich überproportional steigenden Zusammenhang von Unterbrechungskosten und Ausfalldauer.

4. Einschätzung fehlender PQ im Haushaltsbereich

Kariuki [20–22] untersuchte die Bewertung von Ausfällen im Haushaltsbereich in einer umfassenden Studie für Großbritannien. Konkret wurde die Einschätzung eines Ausfalls von Küchen- und Kühlgeräten, Geräten für Kleiderpflege und Hobbys sowie Angst vor Kriminalität und Unfällen, Unbequemlichkeiten durch Temperaturveränderungen und Lichtausfall untersucht. Als am unangenehmsten wurde der Ausfall von Kühlgeräten gefunden, gefolgt von Lichtausfall und Ausfall von Küchengeräten, gefolgt von Angst vor Kri-



minalität und Unfällen im Haushalt. Die Einschätzung von Ausfällen hängt stark von der Häufigkeit und der Tageszeit des Ausfalls ab. Ghajar [13] fand für kanadische Haushalte für Unterbrechungsdauern zwischen 20 Minuten und einem Tag einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Unterbrechungskosten und Ausfalldauer.

5. Regulierung der PQ im liberalisierten Elektrizitätsmarkt

Die Versorgungsqualität war schon immer reguliert. Der Regulierungsbedarf nimmt in liberalisierten Märkten stark zu und bezieht sich – z. B. anhand der Darstellung von Mielczarski [28] für Australien – beim Großhandel auf Qualitätsanforderungen des Marketoperators und der Verteilerunternehmen, beim Einzelhandel auf Leistungsfaktor, Spannungsabweichungen, Spannungsharmonische und Gleichmäßigkeit der Last. Verteilungsunternehmen müssen sicherstellen, dass die Gesamtunterbrechungsdauer pro Jahr am Land 500 Minuten und sonst 250 Minuten nicht übersteigt. Rivier [32] schlägt einen Rahmen für die Regulierung der PQ im liberalisierten Markt vor, der sich auf die Zuverlässigkeit und die Spannungsqualität bezieht und sich an wohlfahrtökonomischen Optimierungskriterien orientiert. Bei der Zuverlässigkeit wird zwischen unterschiedlichen Arten von Verteilungsgebieten unterschieden und eine gute Zuverlässigkeit mittels „performance based regulation“ (PBR) belohnt. Die Spannungsqualität basiert auf der Koordination von Verteilungsunternehmen, Kunden und Komponentenherstellern, die durch internationale Standards für die verwendeten Komponenten sichergestellt wird. In seiner vergleichenden Studie kommt Gomez [15] zum Schluss, dass die PQ mit „price caps“ am besten reguliert wird und sich durchwegs auf Versorgungskontinuität, Spannungsqualität und kommerzielle Services bezieht.

6. PQ für Hochtechnologieunternehmen und eine digitale Gesellschaft

Immer mehr Unternehmen spezialisieren sich auf die Sicherstellung von entsprechender PQ für Hochtechnologieunternehmen. Die jährlichen Kosten von Versorgungsstörungen in den USA nehmen aufgrund der zunehmenden Verwendung von sensitiven elektronischen Geräten immer mehr zu: 1970er ca. 10 Mio. US\$/a, 1980er ca. 100 Mio. US\$/a, 1990er 1 Mrd. US\$/a (Chandler [7]). EPRI schätzt die Verluste pro Ausfall wie folgt: Automobilindustrie und chemische Industrie 50000–500000 US\$; Halbleiterhersteller 250000–1 Mio. US\$; Kompressorhersteller 100000 US\$; Papierfabrik 30000 US\$. EPRI und das Electricity Innovation Institute (Douglas [10]) haben einen eigenen Forschungsschwerpunkt für PQ eingerichtet, der sich vor allem auf die zunehmende Digitalisierung unserer Gesellschaft bezieht. Der Forschungsplan des CEIDS (Consortium for Electric Infrastructure to Support a Digital Society) [8] hat mit einem Forschungsbudget von über 200 Mio. US\$ vor allem eine adäquate Versorgung elektronischer Geräte zum Ziel, die in unserer Gesellschaft eine immer bedeutsamere Rolle spielen.

7. Schlussfolgerungen

Das Unbundling in einen Wettbewerbsbereich (Erzeugung) und den Bereich des natürlichen Monopols der Netze erforder-

te klare Regulierungen vor allem auch der Power Quality, um eine entsprechende Qualität der Versorgung sicherzustellen.

Die Anforderungen an die PQ erhöhen sich entsprechend dem Vordringen von Mikroelektronik und Automatisierung, Ersatz von elektromechanischen durch elektronische Regelungen, Ersatz von Stapelverarbeitung durch kontinuierliche Prozesse, Erhöhung der Computerisierung und generell erhöhten Ansprüchen von Prozessen.

PQ kann nur durch gemeinsame Anstrengungen aller am Elektrizitätsversorgungs- und -anwendungsprozess Beteiligten erreicht werden. Dies bedeutet, dass sowohl die Hersteller von Geräten und Anlagen, die Stromerzeuger, die Übertragungs- und -verteilernetzbetreiber als auch die Kunden mit ihren Geräteausstattungen entsprechend beitragen müssen.

Power Quality ist künftig mehr denn je „verkaufbar“; ihre Kosten sind entsprechend transparent zu machen und den jeweiligen Nachfragern zuzurechnen.

Schrifttum und weiterführende Informationen

- [1] Arango, H., Abreu, J. P. G., Guimaraes, C. A. M., Tahan, C. M. V., Gouvea, M. R., Kagan, N.: Regulation of supply quality in open electricity markets. IEEE 0-7803-6499-6 (2000).
- [2] Arrillaga, J., Bradley, D., Bodger, P.: Power systems harmonics. Chichester, UK: John Wiley, 1985.
- [3] Arrillaga, J., Bollen, M., Watson, N. R.: Power quality following deregulation. Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 2, February 2000, S. 246–261.
- [4] Bauer, L.: Die Risiken in der Elektrizitätswirtschaft, Habilitationsschrift. Technische Universität Wien. Kap. 4: Die Risiken beim Verbraucher elektrischer Energie. 1965, S. 108–110.
- [5] Brill, K. G.: Interim Report of the U. S. Department of Energy's Power Outage Study Team. [<http://tis.eh.doe.gov/post/report.html/>]
- [6] Burke, J.: Using outage data to improve reliability. IEEE Computer Applications in Power, April 2000, S. 57–60.
- [7] Chandler, T.: Power Quality. Presentation Power Quality Inc. [<http://www.powerqualityinc.com/>]
- [8] CEIDS: Consortium for Electric Infrastructure to Support a Digital Society (Initiative by EPRI & The Electricity Innovation Institute): Draft R & D Plan; 45 p., 25. 5. 01. [<http://www.epri.com/cedis/>]
- [9] Crozier, J. T., Wisdom, W. N.: A power quality and reliability index based on customer interruption costs. IEEE Power Engineering Review, April 1999, S. 59–61.
- [10] Douglas, H.: Power for a digital society. EPRI-Journal, Vol. 25 (2000), Nr. 4, S. 18–25.
- [11] Dugan, R., Beatty, W., McGranaghan, M.: Electrical power systems quality. New York: McGraw Hill, 1996.
- [12] Eid, M. S., Moghrabi, C., Eldin, H. K.: A simulation approach to evaluating quality/cost decision scenarios. Computers and Industrial Engineering, Vol. 33 (1997), Nos 1–2, S. 105–108.
- [13] Ghajar, R., Billington, R., Chan, E.: Distributed nature of residential customer outage costs. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11 (1996), No. 3, S. 1236–1244.
- [14] Goel, L., Billinton, R.: Prediction of customer load point service reliability worth estimates in an electric power system. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141 (1994), No. 4, S. 390–396.
- [15] Gomez, T., Rivier, J.: Distribution and power quality regulation under electricity competition. A comparative study. IEEE 0-7803-6499-6 (2000).
- [16] Gomez, T., Ubeda, J. R.: Power quality regulation in Argentina. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13 (1998), No. 3, S. 895–901.

- [17] Hamm, G. L.: Marketing quality differentiated power. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4 (1989), No. 3, S. 856–861.
- [18] Hansen, E., Bush, R. J.: Understanding customer quality requirements – model and application. *Industrial Marketing Management* (1999), 28, S. 119–130.
- [19] Heydt, G. T.: Electric power quality: A tutorial introduction. *IEEE Computer Applications in Power*. 1998, S. 15–19.
- [20] Kariuki, K. K., Allan, R. N.: Assessment of customer outage costs due to electric service interruptions: residential sector. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143 (1996), No. 2, S. 163–170.
- [21] Kariuki, K. K., Allan, R. N.: Applications of customer outage costs in system planning, design and operation. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143 (1996), No. 4, S. 305–312.
- [22] Kariuki, K. K., Allan, R. N.: Factors affecting customer outage costs due to electric service interruptions. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143 (1996), No. 6, S. 521–528.
- [23] Lamedica, R., Esposito, G., Tironi, E., Zaninelli, D., Prudenzi, A.: A survey on power quality cost in industrial customers. *IEEE 0-7803-6672-7* (2001).
- [24] Lawton, P. T.: Costing of transmission outages. Power system control and management. 16–18 April 1996. *IEE-Conference Publication No. 421*, S. 262–267.
- [25] LeBlanc, W. L.: Customer attitudes regarding electric outage costs and back-up generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3 (1988), No. 4, S. 1823–1826.
- [26] McGranaghan, M., Kennedy, B. W., Samototyj, M.: Power quality contracts in a competitive electric utility industry. 8th International Conference on Quality of Power (IEEE/PES and NTUA), Athens, Greece, October 14–16, 1998. *IEEE 0-7803-5105-3* (1998).
- [27] Meliopoulos, A. P. S.: *Grounding and transients*. New York: Marcel Dekker. 1988.
- [28] Mielczarski, W., Michalik, G.: Regulation of power quality in competitive electricity markets. 8th International Conference on Quality of Power (IEEE/PES and NTUA), Athens, Greece, October 14–16, 1998. *IEEE 0-7803-5105-3* (1998).
- [29] Munasinghe, M., Gellerson, M.: Economic criteria for optimizing power system reliability levels. *Bell Journal of Economics*, Spring 1979, S. 353–365.
- [30] Oka, A. A.: Demand not supplied, loss of load probability, and the joint loss of load probability reliability indices for industrial customers. *IEEE 0-7003-6499-6* (2000).
- [31] Pramond, P., Liu, E.: Power quality services: technologies and strategies for energy providers in the deregulated market. *The Electricity Journal* (1999), S. 79–84.
- [32] Rivier, J., Gomez, T.: A conceptual framework for power quality regulation. *IEEE 0-7803-6499-6* (2000).
- [33] Stratford, R. P., Smith, J. Ch. et al.: The electric utility – industrial user partnership in solving power quality problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5 (1990), No. 3, S. 878–886.
- [34] Shepherd, W., Zand, P.: *Energy flow and power factor in non-sinusoidal circuits*. Cambridge: Cambridge, University Press. 1985.
- [35] Sullivan, M. J., Suddeth, B. N., Vardell, T. V., Vojdani, A.: Interruption costs, customer satisfaction and expectations for service reliability. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11 (1996), No. 2, S. 989–995.
- [36] Tollefson, G., Billinton, R., Wacker, G., Chan, E., Aweya, J.: A Canadian customer survey to assess power system reliability worth. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 9 (1994), No. 1, S. 443–450.
- [37] Wacker, G., Billinton, R.: Customer cost of electric service interruptions. *Proc. IEEE*, Vol. 77, No. 6, June 1989, S. 919–930.

Power Quality und technisches Risikomanagement¹

M. Muhr ÖVE²

Die Versorgung mit elektrischer Energie hat aufgrund der Liberalisierung des Strommarkts in der letzten Zeit eine maßgebende Änderung erfahren. Während früher die Versorgung eine Art öffentliche Dienstleistung war und staatlich geregelt wurde, hat die marktwirtschaftliche Öffnung des Strommarkts dazu geführt, dass elektrische Energie als Ware gehandelt wird; elektrische Energie kann frei gekauft werden, einzig die Leitungsnetze haben noch immer eine Art Monopolstellung. Elektrische Energie ist damit zum Produkt geworden, an welches die Verbraucher ihre Ansprüche bezüglich Qualität und Quantität stellen. Die Forderung nach elektrischer Energie hat daher zwei zwar zusammenhängende, jedoch grundsätzlich separate Dimensionen, nämlich die zwei Q: Quantität und Qualität. Während die Energieerzeuger die Aufgabe haben, die Versorgungsquantität an elektrischer Energie zur Verfügung zu stellen, haben die Betreiber der

Verteilnetze gegenüber dem Verbraucher die Verantwortung der Versorgungsqualität übernommen.

Aufgrund des Wechsels vom Verkäufermarkt zum Käufermarkt infolge der Liberalisierung des Strommarkts, muss die Ware Strom für den Kunden gleichartig sein, wobei die Herkunft für den Kunden aber meist unbestimmbar ist. Daher gilt als Qualität die Erfüllung festgelegter und vorausgesetzter Forderungen eines Kunden. Es steht somit eine angemessene Versorgungsqualität stets im Zusammenhang mit der betroffenen Verbrauchereinrichtung. Empfindliche Einrichtungen stellen hohe Qualitätsanforderungen, weniger empfindliche Einrichtungen können mit geringeren Anforderungen auskommen. Die Versorgungsqualität bestimmt auch die kundenseitigen Ausfallkosten, was zur Folge hat, dass die Versorgungsqualität immer mehr zum Wirtschaftsfaktor wird.

Die Versorgungsqualität selbst setzt sich zusammen aus der Versorgungszuverlässigkeit und der Spannungsqualität. Die Versorgungszuverlässigkeit beschreibt dabei die Häufigkeit und Dauer des gestörten Netzbetriebs, während die Spannungsqualität durch die Änderungen in der Versorgungsspannung während des normalen Netzbetriebs bestimmt ist. Normen für die Zuverlässigkeit der Energieversorgung beste-

¹ Kurzfassung eines Vortrags, gehalten anlässlich der 39. Fachtagung der Österreichischen Gesellschaft für Energietechnik im ÖVE, die am 18. und 19. Oktober 2001 in Salzburg stattfindet.

² O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Muhr, Institut für Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik, Abteilung für Hochspannungstechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18, A-8010 Graz.