

전력품질을 고려한 수용가 모선 가격 계산

(Customer Nodal Cost Calculation considering Power Quality)

정성원* · 박인덕 · 김재현 · 이근준

(Sung-Won Jeong · In-Duck Park · Jae-Hyeon Gim · Geun-Joon Lee)

요 약

본 논문은 수용가에 대한 전력요금에 각 모선별로 부과될 경우 모선들의 전력품질을 측정하여 이를 비용화할 수 있다고 가정하였다. 이를 계통계획에 반영하여 예상되는 비용은 샘플계통을 통하여 다음과 같은 계산 방법을 제안하였다.

먼저 모선가격을 계산하기 위해서는 계통에서 전력설비의 운전조건은 최적조류계산에 의해 최적화되어 있는 상황으로 가정하여 모선가격[\$/MVAH]을 산정하고, 계통의 각 모선에 연결된 부하들의 연중 발생하는 고장에 의해 탈락되는 피해비용을 산출하였다. 결과적으로 제안된 방법은 전력품질을 포함한 모선 총합 비용을 계산시 매우 효과적이었다.

Abstract

This paper measures power quality of bus in case electric charges about customer are imposed by each bus, supposed that can calculate this cost. When reflected this in system planning, expected cost proposed following method through sample system.

To calculate nodal cost, operating condition of power equipment calculates nodal cost[\$/MVAH] supposing by situation that is optimized by OPF(optimal power flow) in system. The damage cost that is shed by fault that happen during year of loads in system that is linked on each bus was produced. As a result, proposed method was very effective in case of calculating bus total cost including power quality cost.

Key Words : Power Quality, Nodal Cost, CBEMA Curve, Voltage Sag

1. 서 론

전력품질은 종래에는 전압, 주파수, 무정전을 포함하는 포괄적 개념으로써 사용되었지만 디지털산업 사회로 진입과 더불어 전력공급신뢰도와 순간전압 저하 및 상승, 고조파 및 플리커 등의 다양한 현상에 의해 수용가 측에 피해가 증대되면서 주로 피해가 큰 이상전압 현상들에 대해 중점적으로 연구가 진행

* 주저자 : 순천대학교 공대 전기공학과 박사과정

Tel : 061-750-3540, Fax : 061-750-3508

E-mail : ww180@sunchon.ac.kr

접수일자 : 2006년 12월 29일

1차심사 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 1월 8일

되어 왔다. 더구나 전력시장화가 지속적으로 진행되면서 전력설비에 대한 투자가 병행되지 않음으로써 대·소 정전에 의한 전력품질 저하에 대한 우려가 높아지고 있으며, 특히 우리나라의 경우 디지털반도체 산업 및 프로세스 산업이 차지하는 비중이 높아 순간정전에 의한 수용가의 피해가 사회의 커다란 문제로 대두되고 있다.

그러나 우리나라의 경우 현행 전력회사와 수용가 간의 전력수급계약은 최대계약전력과 사용전력량만에 의해 결정되고 있으며, 전력품질의 성분이 반영되지 않음으로써 정전피해에 대한 적절한 보상 대책 및 이를 극복하기 위한 설비투자의 방안에 대한 사회적 합의는 이루어지지 못하고 있어 전력 거래를 위해 전력품질을 객관적으로 평가할 수 있는 정량적 지표에 대한 연구가 매우 필요하다고 하겠다.

본 논문에서는 샘플 계통에서 전력설비의 운전이 최적조류계산에 의해 최적으로 수행되고 있는 상황을 가정하여 모선가격[\$/MVAH]을 산정하고, 각 모선에 연결된 부하들이 계통상에서 연중 발생하는 고장에 의해 수용가의 부하의 탈락을 초래하는 과정을 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturers Association) 전력허용곡선을 활용하여 각 모선에 대한 모선부하탈락지표(BLDI: Bus Load Drop Index)와 모선전력품질 가격(BPQC: Bus Power Quality Cost)을 구하여 결과적으로 전력품질 피해비용을 산출하여 향후 전력시장화된 계통에서의 모선품질가격을 산출하는 방안을 제시하였다.

2. 전력품질

2.1 CBEMA 곡선

CBEMA 곡선[1]은 배전 전압의 변동 크기와 지속 시간을 부하가 허용할 수 있는 한계범위를 정한 것이다. 그림 1은 CBEMA 곡선으로서 전력의 만족도를 가장 잘 표현한 곡선으로 알려져 있다. 여기서 세로축은 이벤트 동안의 전압의 크기를 나타낸 것이며, 가로축은 이벤트의 지속기간을 시간의 로그 눈금으로 나타낸 것이다. 표시하는 방법은 약간씩 차이가 있는데, 경우에 따라서는 세로축을 정격 값에서의

전압의 편차로 나타낼 수도 있고, 가로축을 선형값으로 나타내거나 cycle로 표시하는 경우도 존재한다. 단시간 이벤트는 CBEMA 곡선의 왼쪽 축에 가까우며, 정상상태의 외란은 오른쪽으로 거의 가로축에 근접되어 있다.

그림 1에서 허용 가능한 운전범위는 과전압은 위쪽 곡선한계까지, 저전압은 아래쪽 곡선의 한계까지이다. 전력만족 곡선 상에서 과전압 영역은 중요하지만 일반적으로 순간적인 저전압 사건의 영향이 매우 관측되기 때문에 보통 전압강하(Voltage Sag)에 상대적으로 관심이 집중되고 있으며, 본 논문도 저전압 부분만을 다루고 있다.

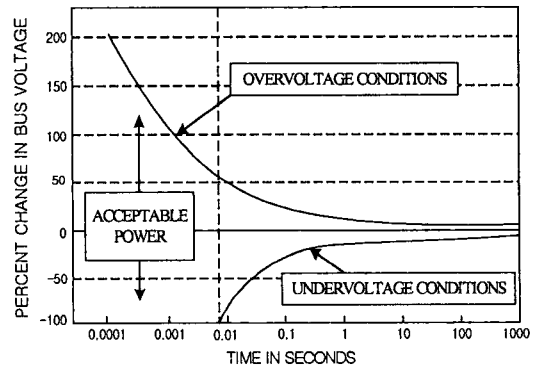


그림 1. CBEMA 전력만족곡선
Fig. 1. CBEMA power acceptability curve

2.2 전력품질 가격 결정

같은 외란이라도 수용가 부하 특성과 종류에 따라 정전 유발 및 품질저하에 따른 품질 비용이 달라지므로 가격과 외란의 가혹한 정도에 기반한 전력품질 지표를 연구해볼 필요가 있다. 이를 위해 모선부하탈락지표와 모선평균 전력품질비용이라는 새로운 2개의 지표를 연구하였다[2].

2.2.1 부하탈락지표(BLDI)

각 시간 영역동안 등가 부하 탈락 지표는 다음과 같다.

$$\text{모선부하 탈락지표(BLDI)} = \sum_{k=1}^m LDZ(k) \quad (1)$$

전력품질을 고려한 수용가 모선 가격 계산

$$LDZ(k) = \sum_{i=1}^{n_i} P(w_i) \times \text{탈락부하비율}(LDP_i) \quad (2)$$

여기서, w_i : 이상전압영역상 한점의 에너지값

$P(w_i)$: 에너지 영역에서의 부하탈락 확률

부하 탈락의 확률을 각 불허용 영역에서 1로 가정하면

$$BLDI(i) = \text{각 영역 } N_i \text{ 에서의 사건 수} \\ \times \text{부하 탈락 비율}(\rho_{Li}) \quad (3)$$

2.2.2 전력품질의 가격

IEEE 1159의 각 시간계급에 대해 BLDI 값을 알면, 각 수용가에 대한 전력품질 가격을 계산할 수 있다. Billington, Sullivan 등은 부하차단의 시간 및 업종별로 차단비용을 연구하였으며[3-4], 그 대표적인 비용은 표 1과 같다.

표 1. 전력 차단 평균 비용
Table 1. Average cost of power interruption

시간구분	평균단가 (US \$ / kW)
Instantaneous	0.078
Momentary	0.176
Temporary	1.22
Sustained	3.63

표 1의 자료들을 BLDI의 모선부하탈락횟수와 조합하여 계산한 결과 모선 전력품질 가격(BPQC)을 얻을 수 있다.

$$BPQC = \sum_{k=1}^m C_k \times BLDI(k) \quad (4)$$

여기서 C_k : IEEE 1159 급에서 분류된 계급의 평균 차단 비용(표 1)

3. 사례 연구

3.1 샘플 계통

샘플 계통은 그림 2와 같이 IEEE 9모선 계통을 이용하였다. 9모선은 3대의 발전기, 9개의 송전선로 및 3개의 변압기로 구성되어 있으며, 총 부하는 315 [MW]이다.

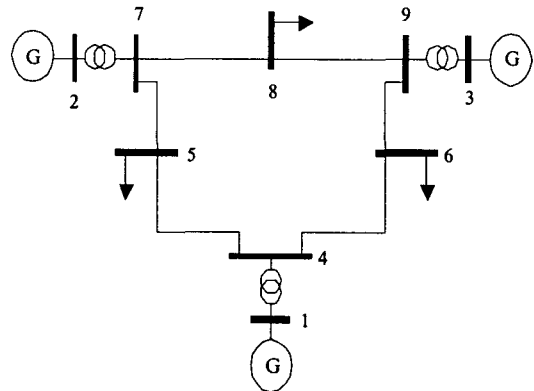


그림 2. IEEE 9모선 샘플 계통
Fig. 2. IEEE 9Bus system

3.2 모선별 전력품질의 가격 산정

3.2.1 모선가격 선정

샘플계통의 nodal cost는 최적조류계산을 이용하였으며 그 결과는 표 2와 같이 산출되었다.

표 2. 샘플계통에 대한 모선 가격
Table 2. Nodal cost for sample system

Bus Data									
Bus #	Voltage		Generation		Load		Lambda(\$/MVA-hr)		Q
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P	Q	
1	1.050	0.000	98.14	18.02	-	-	24.831	-	
2	1.050	5.323	134.32	6.58	-	-	24.834	-	
3	1.048	3.509	94.21	-15.38	-	-	24.881	-	
4	1.041	-2.722	-	-	-	-	24.832	0.022	
5	1.016	-5.109	-	-	125.00	50.00	25.108	0.167	
6	1.038	-4.398	-	-	98.00	30.00	25.104	0.063	
7	1.049	0.953	-	-	-	-	24.836	0.034	
8	1.038	-1.359	-	-	100.00	35.00	24.288	0.065	
9	1.050	0.611	-	-	-	-	24.881	-	
Total:			318.67	9.22	315.00	115.00			

연간 모선전력 가격은 식 (5)와 같다.

$$\text{모선전력가격} = \lambda \times P_{Load} \times 8760 \quad (5)$$

여기서 λ : 모선 가격을 결정하는 Lagrange 계수

3.2.2 부하구성비

모선별 전력품질의 가격 산정을 하기 위해 부하모선인 5, 6, 8번 모선의 수용 구성비는 표 3과 같이 가정하였고, 각 수용가유형에 따른 부하 구성 원도우는 표 4와 같이 가정하였다.

표 3. 부하 모선의 부하구성비
Table 3. Load composition data of load buses

모선번호	주거용 [%]	상업용 [%]	대산업용 [%]	소비전력 [MW]
5			100	125
6	100			90
8		100		100

표 4. 수용가 유형별 부하 구성 원도우
Table 4. Load window of customer types

	전등 [%]	전동기 [%]	변환기 [%]	계
주거용	100			100
상업용			100	100
대산업용		100		100

결과적으로 5번 모선의 부하는 전동기, 6번, 8번 모선의 부하는 각각 전등, 변환기(인버터)로 설정하였다.

3.2.3 부하의 전압특성

각 부하의 전압에 대한 특성은 참고문헌[5]를 참조하여 다음과 같다고 가정하고, 각각의 부하에 대해 전등부하는 0.01[sec], 전동기 부하는 0.03[sec],

변환기 부하는 0.05[sec] 이내에서는 sag에 영향을 받지 않는 것으로 하였다.

전동기 :

$$V_{end} = \frac{0.575 - 0.325e^{-40T} - 0.57e^{-29.31T}}{1 - e^{-29.31T}} \quad (6)$$

전 등 :

$$V_{end} = \frac{0.9 - 0.3e^{-711.6T} - 0.9e^{-0.0272T}}{1 - e^{-0.0272T}} \quad (7)$$

변환기 :

$$V_{end} = \frac{0.87 - 0.288e^{-1.06T} - 0.712e^{-23.7T}}{1 - e^{-23.7T}} \quad (8)$$

식 (6)~(8)과 조건을 이용하여 CBEMA 곡선을 그리면 그림 3과 같다.

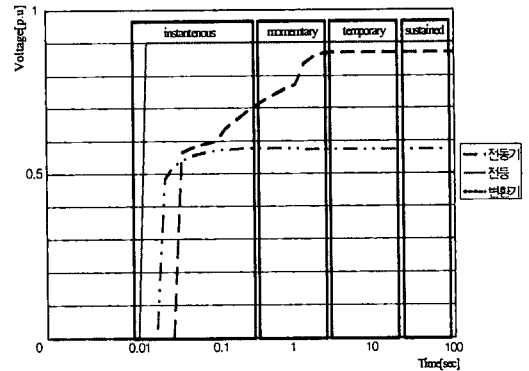


그림 3. 부하모선에서 sag와 차단에 의한 부하차단영역
Fig. 3. Load drop areas considering various kinds of CBEMA curve

3.2.4 각 모선별 고장기록

각 모선에 고장을 발생시켜 모선의 전압변화를 조사하였다. 계산의 편의상 각 모선의 고장은 모선별로 연간 1회씩 발생한다고 가정하여 계산하였다.

3.2.5 고장계산

고장계산시 고장은 3상 단락고장을 고려하였고, 고장점의 리액턴스는 0.1[p.u]로 하였다. 그리고 sustained 기간 동안의 고장은 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 결과적으로 각 시간영역별로 고장시 각 모선의 전압값을 나타내면 표 5~7과

전력품질을 고려한 수용가 모션 가격 계산

같으며, 음영부분은 부하의 탈락을 일으키는 전압의 값이다.

표 5. instantaneous 고장시 각 모선의 전압값
Table 5. Bus voltages during instantaneous fault

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0.8042	0.8294	0.8628	0.6554	0.4678	0.7617	0.7326	0.7891	0.8147
6	0.8014	0.8779	0.7886	0.6505	0.7528	0.4514	0.8087	0.7883	0.7142
8	0.8976	0.7672	0.7523	0.8201	0.7934	0.8001	0.6349	0.4770	0.6649

표 6. momentary 고장시 각 모선의 전압값
Table 6. Bus voltages during momentary fault

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0.7685	0.7865	0.8341	0.6264	0.4489	0.7340	0.6994	0.7568	0.7837
6	0.7664	0.8415	0.7605	0.6230	0.7254	0.4352	0.7769	0.7592	0.6875
8	0.8667	0.7128	0.7166	0.7851	0.7577	0.7677	0.5952	0.4502	0.6300

표 7. temporary 고장시 각 모선의 전압값
Table 7. Bus voltages during temporary fault

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0.4418	0.5140	0.5665	0.3596	0.2812	0.4697	0.4517	0.4947	0.5136
6	0.4374	0.5558	0.5103	0.3546	0.4559	0.2743	0.4988	0.4948	0.4504
8	0.4826	0.3878	0.4135	0.4065	0.4112	0.4263	0.3088	0.2416	0.3413

3.2.6 모션별 비용

이상의 자료들을 이용하여 각 부하 모션별로 계산된 BLDI 및 BPQC는 표 8과 같으며, 각 모션총합비용은 표 9와 같다. 표 9에서 충분비는 상대적으로 순간전압강하에 덜 민감한 부하를 갖고 강인하게 설계된 5번 모션이 상대적으로 낮았다.

표 8. 모션별 부하탈락지표 및 전력품질가격지표

Table 8. BLDI and BPQC of each bus

모션 NO	BLDI (회)	전력차단비용 [\$ /kw]	부하전력 [kW]	BPQC [M\$/year]
5	1	0.078	125,000	1.404
	1	0.176		
	9	1.22		
6	9	0.078	90,000	1.194
	9	0.176		
	9	1.22		
8	1	0.078	100,000	1.229
	7	0.176		
	9	1.22		

표 9. 전력품질비용을 포함한 모션총합비용
Table 9. Nodal total cost containing voltage sag cost

모션 NO	모션전력가격 [M\$/year]	BPQC [M\$/year]	total [M\$/year]	충분비
5	27.493	1.404	28.897	1.051
6	19.792	1.194	20.986	1.060
8	21.269	1.229	22.498	1.058

4. 결 론

전력계통에 작용하는 외란이 순간정전을 유발하고 이로 인한 각 부하의 부하들이 어떤 영향을 받는가를 고장계산에 의해 순간전압강하를 계산하고, 부하의 특성을 load window와 load composition data를 이용하여 계산하는 방법을 모의계통에 대해 적용해 계산해 보았으며, 각 모션에 대한 모션부하탈락지표(BLDI)와 모션전력품질 가격(BPQC)을 반영하여 모션품질가격을 산출하였다.

그 결과 고장이 각 모션전압에 미치는 영향과 부하의 전압에 대한 민감성에 따라 각 모선의 모션가격이 전력품질의 변화에 따라 변동하였다.

따라서 본 논문에서 제시된 모선품질가격을 산출하는 방법을 이용하여 향후 전력시장화된 계통에서 전력수급계약의 정량적 지표로 활용이 가능할 것이다.

본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] ANSI/IEEE Standard 446-1987, "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power System for Industrial and Commercial Application".
- [2] 이근준, "부하의 전압특성을 고려한 모선품질 전력품질 지표 및 가격 산정기법", 대한전기학회 논문지 52A-4-4, 2003년 4월, pp. 213-218.
- [3] G. Tollefson, R. Billinton, G. Wacker, E. Chan, J. Aweya, "A Canadian customer survey to assess power system reliability worth", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994, pp. 443-450.
- [4] M. J. Sullivan, T. Vardell, " Interruption cost, customer satisfaction and expectations for service reliability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp. 989-995.
- [5] G. J. Lee, G. T. Hedyt, "A Power Quality Index Based on Equipment Sensitivity, Cost and Network Vulnerability", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.19, No.3, July 2004. pp. 1504-1510.

박인덕 (朴仁德)

1969년생. 1995년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1999년 명지대학교 전기전자대학원 졸업(석사). 2005년 공주대학교 전기전자정보대학원 졸업(박사). 2005년 1월~11월 주)KMC 기술연구소 책임연구원. 2005년 11월~2006년 8월 한국폴리텍IV대학 성장동력사업단 매니저. 2006년 9월~현재 주)그린넷 파워 연구개발 팀장.
Tel : (042)862-3722
Fax : (061)730-6329
E-mail : pbj0808@nate.com

김재현 (金在顯)

1956년 1월 25일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사). 1993년 동 대학교 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 전기제어공학과 부교수.
Tel : (061)750-3545
Fax : (061)750-3508
E-mail : jhg@sunchon.ac.kr

이근준 (李根準)

1957년 9월 4일생. 1981년 울산공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 울산대 전기공학과 졸업(박사). 1976~1998년 한전전력연구원 선임연구원. 1988~1989년 미국 University of Texas at Arlington 에너지시스템 연구소 연구원. 2001~2002년 미국 Arlington State University PSERC 교환교수. IEEE Senior member, 발송배전기술사. 현재 충북과학대학 전기과 교수.
주요관심분야 : 전력계통 안정도, FACTS, 전력품질 평가 시스템, 분산전원
Tel : (043)730-6321
Fax : (043)730-6329
E-mail : gjlee@ctech.ac.kr, roundyou@hotmail.com

◇ 저자소개 ◇

정성원 (鄭盛元)

1975년 11월 26일생. 2002년 순천대 전기제어공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 박사과정.
Tel : (061)750-3540
Fax : (061)750-3508
E-mail : ww180@sunchon.ac.kr