

An Approach to Allocating Transmission System Reliability Cost

鄭 求 亨* · 申 英 均** · 金 發 鎬***
(Koo-Hyung Chung · Young-Kyun Shin · Bal-Ho Kim)

Abstract - The efficient and rational transmission tariff structure is one of the crucial factors in creation of fair and competitive electricity markets. Transmission charge can be largely categorized into the line usage charge, system reliability charge, access charge and others. Any transmission tariff should be able to reflect these cost components reasonably. This paper suggests an approach amenable to allocating the transmission reliability costs reasonably with reflection of line sensitivity and line outage rate.

Key Words: Transmission charge, transmission reliability costs, line sensitivity, line outage rate, transmission reliability contribution

1. 서 론

전 세계적으로 전력산업은 전례없는 변화를 겪고 있다. 이러한 변화들은 전력산업에 있어서 기존의 수직통합적 구조의 해체를 초래하였으며, 궁극적으로는 발전 및 배전분야에서의 경쟁을 도입하여 전력산업의 효율성을 증대하고자 함이다. 그러나, 규모의 경제가 존재하는 송전분야는 여전히 독점형태로 운영되며, 설비운영의 공정성 확보는 경쟁적 전력시장의 성공여부를 결정짓는 중요한 요소가 된다.

이러한 송전계통 운영의 공정성을 형성하는 중요한 요소 가운데 하나가 합리적인 송전요금체제이다. 송전요금은 크게 선로사용에 대한 부분, 계통신뢰도 유지에 대한 부분 그리고 접속료 및 기타 비용으로 구성되며, 송전요금체제에는 이러한 비용요소들이 합리적으로 반영되어야 한다.

본 논문에서는 송전요금체제의 구성요소 가운데, 계통신뢰도 유지를 위한 송전비용의 배분방법에 대해서 논하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 정상상태에서의 선로사용을 계산결과를 바탕으로 하며, 단일 선로사고($n-1$ 상정사고)에 대한 각 선로의 민감도와 선로고장율을 반영하여 각 계통 참여자의 계통신뢰도에 대한 영향 정도를 계산함으로써 보다 합리적으로 계통신뢰도 비용을 배분하고자 한다.

2. 신뢰도 비용의 배분방법

2.1 개요

일반적으로 송전선로는 상당부분의 예비력(설비용량-최대 예상 조류량)을 보유하고 있다. 이러한 예비력은 해당 송전선로의 송전능력에만 영향을 미치는 것이 아니라, 계통 전체의 신뢰도에도 영향을 미치게 된다. 그러므로, 이러한 신뢰도의 영향을 적절히 송전요금에 반영함으로써 최종 송전요금의 왜곡을 줄이는 과정은 공정한 송전계통 운영의 필수적인 요소라 할 수 있다. 다만, 이러한 신뢰도 평가방법과 평가된 신뢰도를 요금에 반영하는 방법에 대해서는 여러 가지 견해가 존재하고 있다.

Silva[1]는 신뢰도를 확률적으로 처리하여 송전요금에 반영하는 방법을 제안하고 있다. 이 방법은 전력조류변화에 대한 기대치를 이용하여 정상상태일 때와 상정사고 시, 그리고 전력거래가 있는 경우와 없는 경우 등 각 조합에 대해 계통신뢰도를 계산한 다음, 이를 비용화하여 송전요금에 반영시킴으로써 송전비용의 완전회수를 목적으로 하고 있다. 그러나 비용산정 방법이 어렵고 또한, 기준 전력조류에 따라 문제점이 발생할 수 있다.

Yu[2]는 투자비 회수를 목적으로, 개별 송전선 사용에 대한 신뢰도 이득을 송전요금에 반영하고 있다. 그러나 신뢰도 이득을 계산하는 방법에 있어 개별 송전선의 여유용량을 고려하지 않고 있다.

Billington[3]은 사전에 신뢰도 기준을 정해 두고, 신뢰도를 저해하는 상정사고를 확률적으로 고려하여, 신뢰도 저해 정도에 따라 비용을 부과하고 있다. 그러나, 신뢰도 산정기준이 모호하여 적용이 어려운 점이 있다.

Chao[4]는 송전계통의 신뢰도 유지를 위한 계통운영자의 역할에 초점을 맞추고 있다. 즉, 송전선 이용권(trans-

* 準 會 員 : 弘 益 大 學 電 氣 情 報 制 御 工 學 科 碩 士 課 程
** 正 會 員 : 弘 益 大 學 電 氣 情 報 制 御 工 學 科 博 士 課 程
*** 正 會 員 : 弘 益 大 學 電 氣 情 報 制 御 工 學 科 助 教 授 · 工 博
接 受 H 字 : 2001 年 8 月 29 日
最 終 完 了 : 2002 年 2 月 18 日

mission rights) 개념을 도입하여 계통운영자의 개입에 따른 비용을 송전요금에 반영하고 있다. 그러나, 이 방법은 송전계통의 신뢰도를 고려한 것이기보다는 운영자의 역할에 따른 방법이므로 신뢰도를 송전요금에 반영하였다고 보기는 어렵다.

또한, Kirschen[5]이 제안한 송전요금 산정방법은 계통의 상정사고와 모든 부하수준을 반영하여, 해당선로의 최대조류상태에 대한 각 발전기(또는 부하)의 선로이용률을 계산하여 이를 비용화함으로써 송전비용의 완전회수를 목적으로 하고 있다. 그러나, 이 방법은 각 참여자에게 배분되는 선로의 신뢰도비용을 산정하는 것이 아니라, 해당 선로에 최대조류를 야기하는 상정사고의 영향을 반영하여 선로이용률을 산정하는 것을 목적으로 한다. 그러므로, 이 방법은 전체 계통의 신뢰도를 유지하기 위한 비용의 지분이 해당 선로 사용자에게만 부과되어야 하는지에 대한 의문을 제기한다. 왜냐하면, 선로의 예비력은 해당 선로의 사용자만을 위한 것이 아니며, 계통 전체의 모든 사용자들을 대상으로 확보되어야 하는 것이기 때문이다.

따라서, 본 논문에서는 실제 선로이용과는 다른 별도의 송전계통 신뢰도비용을 계통참여자들에게 배분하기 위한 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 정상상태에서의 각 계통참여자들의 선로이용률을 바탕으로, n-1 상정사고에 대한 각 선로의 조류변화에 대한 민감도와 함께 선로고장율을 반영하여 개별 계통참여자들이 해당 선로에 미치는 신뢰도 영향 정도를 평가하고, 이를 바탕으로 신뢰도비용을 배분한다.

2.2 신뢰도 영향평가 방법

일반적으로 특정 시간대에서의 계통신뢰도를 평가하기 위해서는 모든 상정사고를 연속적으로 시험한다. 그러나, 실제 송전계통에서는 단일 선로고장 사고의 대부분을 차지하므로 본 논문에서는 단일 선로고장(n-1 상정사고)에 대한 민감도와 선로고장확률만을 고려한다.

2.2.1 선로의 민감도 계산

각 선로의 고장이 다른 선로에 끼치는 영향을 판단하기 위해 다음과 같은 민감도 계수를 정의한다.

$$S_{l,k} = \frac{|f_l^k|}{|f_l^l|} - 1, \quad |f_l^k| > |f_l^l| \quad (1)$$

$$= 0, \quad |f_l^k| \leq |f_l^l|$$

단,

f_l^l : 정상상태에서의 선로 l의 선로조류량

f_l^k : 선로 k 고장 시 선로 l의 선로조류량

이 민감도 계수는 LODF(line outage distribution factor)와 유사하나, 그 의미에 있어서는 약간의 차이가 있다. LODF는 고장선로에 흐르던 선로조류량을 나머지 선로들이 어느 정도 부담하는가를 보여주는 반면[6], 위의 계수는 특정 선로가 다른 선로들의 개별적인 고장에 대해 어느 정도의 영향을 받는가, 다시 말하면 각 선로의 고장으로 인해 특

정 선로의 선로조류량이 정상상태에서의 선로조류량과 비교하여 어느 정도 변하는 가를 보여주는 것이다.

또한, 위의 민감도 계수는 n-1 상정사고 시, 특정선로의 선로조류량이 정상상태에서의 선로조류량보다 증가한 경우에 대해서만 고려하였다. 이는, 정상상태일 때보다 감소한 선로조류량은 계통신뢰도에 영향을 끼치지 않는 것으로 가정하였기 때문이다.

2.2.2 선로의 고장확률

선로의 민감도와 함께 신뢰도 평가요소로서 각 선로의 고장확률(또는 고장시간)을 반영하고자 한다. 단일 선로고장 즉, n-1 상정사고만을 가정하였으므로 각각의 선로들의 고장은 중첩되지 않는다.

2.2.3 신뢰도 영향 계수

신뢰도 평가를 위해 선로의 민감도와 고장시간을 동시에 반영하기 때문에, 위의 두 계수를 통해 다음과 같은 신뢰도 영향 계수를 정의한다.

$$W_{l,k} = S_{l,k} \cdot T_k \quad (2)$$

단,

$W_{l,k}$: 선로 k의 고장이 선로 l의 신뢰도에 미치는 영향 정도

$S_{l,k}$: 선로 k의 고장에 대한 선로 l의 민감도

T_k : 선로 k의 고장확률(고장시간)

그 다음, 특정 선로에 대한 나머지 다른 선로들의 고장으로 인한 상대적인 영향도를 계산하기 위하여 다음과 같이 해당 선로를 기준으로 정규화한다.

$$NW_{l,k} = \frac{W_{l,k}}{\sum_{j=1}^n W_{l,j}} \quad (3)$$

2.2.4 신뢰도 영향 정도의 배분

위의 과정을 통해 각 선로고장에 대한 신뢰도 영향 계수를 계산하면, 이를 바탕으로 신뢰도 영향 정도를 각 발전기(또는 부하)에 배분해야 한다. 특정 선로에 미치는 신뢰도 영향은 고장이 발생한 각 선로가 해당 선로에 끼치는 영향 정도와 각 발전기(부하)가 정상상태에서 고장선로를 사용하는 정도에 따라 다음과 같이 배분된다.

$$C_{Ai}^R = \sum_{j=1}^n NW_{l,j} \cdot C_{Aj}^0 \quad (4)$$

단,

C_{Ai}^R : 선로 l의 신뢰도에 대한 발전기 A의 영향도

C_{Aj}^0 : 정상상태에서의 선로 j에 대한 발전기 A의 선로이용률

그러므로, (4)식으로 계산된 각 선로에 대한 발전기(부하)의 신뢰도 영향 정도에 따라 선로의 신뢰도 비용을 배분함으로써 각각의 선로에 대해 각 참여자들이 부담하는 해당 선로의 신뢰도 비용을 산정할 수 있게 된다.

$$RC_{Ai} = Cost_i \cdot C_{Ai}^R \quad (5)$$

단,

RC_{Ai} : 선로 i 에 대해 발전기 A 가 부담하는 신뢰도 비용

$Cost_i$: 선로 i 의 신뢰도 비용.

또한, 이 방법은 발전기의 선로이용률 대신 각 부하의 선로이용률 계산결과를 이용하면, 이 결과에 식 (4)와 (5)를 적용하여 부하에 대해서도 각 부하가 부담하는 신뢰도 요금을 산정할 수 있다.

3. 사례 연구

사례연구는 <그림 1>과 같은 참고문헌[8]의 6모선 계통을 수정하여 수행하였다. 계통의 선로데이터는 <표 1>과 같다. <표 2>는 이 계통에 대한 각 발전기의 선로이용률을 보여주고 있으며, 이는 참고문헌[7]의 방법으로 계산하였다.

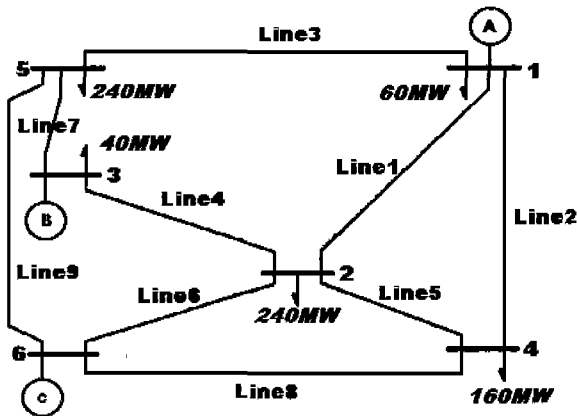


그림 1 6모선 예제계통

Fig. 1 One-line diagram of the 6-bus example system

표 1 6모선 예제계통의 선로 데이터

Table 1 Line data of the 6-bus example system

	From	To	Resistance	Reactance	Shunt
Line1	1	2	0.0012	0.0150	0.0000
Line2	1	4	0.0150	0.0920	0.1810
Line3	1	5	0.0230	0.1380	0.2710
Line4	2	3	0.0170	0.1660	0.3260
Line5	2	4	0.0230	0.1380	0.2710
Line6	2	6	0.0020	0.0240	0.0000
Line7	3	5	0.0010	0.0120	0.0000
Line8	4	6	0.0120	0.0150	0.0000
Line9	5	6	0.0150	0.0920	0.1810

또한, 편의상 각 선로의 고장시간은 <표 3>과 같다고 가정하였으며, 각 선로고장에 대한 특정선로의 민감도 계산 결과는 <표 4>와 같다.

표 2 각 발전기의 선로이용률(C_{Ai})

Table 2 Usage contribution of the generator under normal state in each line(C_{Ai})

	발전기 A	발전기 B	발전기 C
Line1	0.5276	0.1886	0.2838
Line2	0.5276	0.1886	0.2838
Line3	-	0.7164	0.2836
Line4	-	1.0000	-
Line5	0.5276	0.1886	0.2838
Line6	-	-	1.0000
Line7	-	1.0000	-
Line8	-	-	1.0000
Line9	-	-	1.0000

표 3 선로의 고장시간(T_k)

Table 3 Line outage time(T_k)

선로	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6	Line7	Line8	Line9
고장시간	12	24	15	48	20	18	36	18	30

표 4 선로의 민감도($S_{i,k}$) 계산 결과

Table 4 The calculation of the line sensitivity factor($S_{i,k}$)

	고장 선로								
	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6	Line7	Line8	Line9
Line1	-	0.1793	-	0.1377	-	0.0803	-	0.0851	-
Line2	3.3875	-	-	0.0122	0.8661	-	0.0376	0.3260	-
Line3	0.8859	-	-	1.0777	-	0.5954	0.9280	1.1381	-
Line4	0.3100	0.0005	0.0922	-	-	0.1698	2.6077	0.3102	-
Line5	0.6030	0.6176	-	-	-	-	1.4227	1.3497	-
Line6	0.4580	-	0.1273	0.4265	-	-	-	0.6415	0.6447
Line7	-	-	-	0.3815	0.0367	-	-	-	0.1894
Line8	0.2131	0.0450	0.1102	0.3529	0.2653	0.2914	-	-	0.5484
Line9	-	-	-	-	-	0.3367	1.6314	0.6307	-

위의 결과들을 바탕으로 각 선로에 대해 식 (2)와 (3)을 적용하면 <표 5>와 같은 신뢰도 영향 계수를 얻을 수 있다. 이 신뢰도 영향 계수 계산결과와 <표 2>의 발전기의 선로이용률 계산결과를 바탕으로 식 (4)를 통해 각 선로에 대한 각 발전기의 계통신뢰도에 대한 영향도를 계산할 수 있다. 이에 대한 결과는 <표 6>에서 보여주고 있다.

표 5 신뢰도 영향 계수($NW_{i,k}$)의 계산 결과

Table 5 The calculation of the normalized reliability factor ($NW_{i,k}$)

	고장 선로								
	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6	Line7	Line8	Line9
Line1	-	0.3097	-	0.4759	-	0.1041	-	0.1103	-
Line2	0.6180	-	-	0.0089	0.2634	-	0.0206	0.0892	-
Line3	0.0837	-	-	0.4074	-	0.0844	0.2631	0.1613	-
Line4	0.0346	0.0001	0.0129	-	-	0.0284	0.8722	0.0519	-
Line5	0.0742	0.1519	-	-	-	-	0.5249	0.2490	-
Line6	0.0935	-	0.0325	0.3484	-	-	-	0.1965	0.3291
Line7	-	-	-	0.7405	0.0297	-	-	-	0.2298
Line8	0.0519	0.0219	0.0336	0.3440	0.1078	0.1066	-	-	0.3342
Line9	-	-	-	-	-	0.0774	0.7776	0.1450	-

표 6 각 발전기의 신뢰도 영향 정도($C_{A_i}^R$)의 계산 결과

Table 6 The calculation of the reliability contribution of each generator($C_{A_i}^R$) under contingency condition(n-1 line outage state)

	발전기 A	발전기 B	발전기 C
Line1	0.1634	0.5343	0.3022
Line2	0.4650	0.1957	0.3393
Line3	0.0442	0.6863	0.2695
Line4	0.0183	0.8879	0.0938
Line5	0.1193	0.5676	0.3132
Line6	0.0493	0.3893	0.5614
Line7	0.0157	0.7461	0.2382
Line8	0.0958	0.4024	0.5018
Line9	-	0.7776	0.2224

이 결과를 <표 1>의 선로이용률과 비교해 보면, 계통참여자들의 각 선로에 대한 신뢰도 영향 정도는 실제 해당 선로의 이용률과는 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 신뢰도 요금은 선로 사용료와는 구분되어 부과되는 것이 합리적이라 할 수 있다.

4. 결 론

전력산업 구조개편으로 인해 합리적인 송전요금 산정의 중요성은 점차 증가하고 있다. 이와 관련하여, 본 논문에서는 특히 계통신뢰도 유지비용의 산정방법에 대한 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 방법은 계통신뢰도 유지비용을 각 선로의 선로고장에 대한 특정 선로의 선로조류 변화 정도와 함께 고장선로의 선로 고장확률을 반영하여, 계통참여자가 각 선로의 신뢰도 수준에 영향을 미치는 정도에 따라 보다 합리

적으로 신뢰도 유지비용을 부과하여 이를 회수하고자 하였으며, 사례연구를 통해 계통참여자의 선로이용률과 신뢰도 영향 정도가 서로 다르게 계산되는 것을 확인할 수 있었다.

그러나, 본 논문에서는 각 선로의 신뢰도 비용과 고장확률에 대한 가정을 전제로 하고 있으므로, 이러한 부분들에 대한 추가 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년 학술진흥재단(과제번호 : E00136) 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] E. L. Silva, "Transmission Access Pricing to Wheeling Transmission : A Reliability Based Access", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.13, No.4, pp.1431-1486, November 1998
- [2] C. W. Yu, "Pricing Transmission Services in the Context of Industry Deregulation", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.12, No.1, pp.503-510, December 1997
- [3] R. Billington, "Reliability Issues in Today's Electric Power Utility Environment", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.12, No.4, pp.1708-1714, November 1997
- [4] Hung-Po Chao, "Reliability Management in Competitive Electricity Markets", EPRI, pp.1-17, May 1997
- [5] Goran Strbac, Daniel Kirschen, Syed Ahmed, "Allocating Transmission System Usage on the Basis of Traceable Contributions of Generators and Loads to Flows", IEEE Transactions on Power System, Vol.13, No.2, pp.527-534, May 1998
- [6] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control" 2nd Edition, Wiley-Interscience publication, pp.411~452, 1996
- [7] Daniel Kirschen, Ron Allan, Goran Strbac, "Contributions of Individual Generators to Loads and Flows", IEEE Transactions on Power System, Vol.12, No.1, pp.52-60, February 1997
- [8] Micheal Einborn, Riaz Siddai, "Electricity Transmission Pricing and Technology", Kluwer Academic Publishers, pp.59~76, 1996
- [9] 서울대학교 경제연구소, "전력시장 경쟁도입을 위한 기초 연구", 한국전력공사 전력산업구조조정실, pp.167~266, 1999. 8
- [10] 기초전력공학공동연구소, "송전선 혼잡처리 비용 및 송전선 이용료 설정에 관한 연구", 한국전력공사 송변전처, pp.1~10, 2000. 2
- [11] 김발호, 박종배, "송전선이용료 산정 기법", 2000. 8

저 자 소 개



정 구 형 (鄭 求 亨)

1974년 9월 20일생. 2001년 홍익대학교
전기전자제어공학과 졸업. 2001년 동대학
원 석사과정.

Tel : 02-338-1621

E-mail : gal110412@wow1.hongik.ac.kr



신 영 군 (申 英 均)

1974년 5월 31일생. 1999년 홍익대학교
전기전자제어공학과 졸업. 2001년 동 대
학원 졸업(석사). 2001년 동 대학원 박사
과정.

Tel : 02-338-1621

E-mail : alijin@wow1.hongik.ac.kr



김 발 호 (金 發 鎬)

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대 전기
공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사
기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992
년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과
졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박사).
1999년~현재 홍익대학교 전자전기제어공
학부 조교수

Tel : 02-320-1462

Fax : 02-320-1110

E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr