우리나라에서의 확률론적인 신뢰도와 공급예비율의 상관관계성에 관한 연구

박정제*, 정상헌*, 사박*, 오량*, 최재석*, 윤용범**, 정영범**, 차준민***, 윤용태+
경상대학교*, 한전 전력연구원**, 대진학교***, 서울대학교+

A study on the Characteristics of Relationship Between Probabilistic Reliability and Supply Reserve Rate in Korea Power System

JeongJe Park*, S.H. Jeong*, B. Shi*, L. Wu*, J.S. Choi*, Y.B. Yoon**, Y.B. Jung**, J.M. Cha***, Y.T. Yoon+

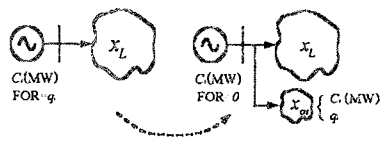
Abstract - This paper introduces the characteristics of relationship between probabilistic reliability (LOLE; Loss of Load Expectation) and deterministic reliability (SRR; supply reserve rate) for 2008 year in Korea power system. Korea power system has been using the LOLE criterion to determine the adequacy of installed capacity (ICAP) requirement. The criterion is that load shall not exceed the avaliable capacity, on the average, more than five day in ten years. The probabilistic reliability evaluation and production cost simulation program which is called PPHFHT was used in order to obtain the relationship in this paper.

1. 서 론

최근 우리나라의 경우에 전원개발계획추정에 의하면 2015년까지 공급예비율이 50[%]까지 육박할 것으로 예상된다. 또한, 계통규모가 과거 20년 전에 비하여 10배 이상, 그리고 10전에 비하여 5배 이상 커짐에 따라 과거의 공급예비율의 값이 더 이상 동일한 의미를 지니지 않게 되었다. 공급예비율에 대한 의미해석은 앞으로 신재생 전원의 적극적인 계통진입으로 더더욱 다른 의미에서 바라보아야할 것으로 사료된다. 이에 따라, 현재 우리나라가 1996년도부터 설정하여 사용하고 있는 전원개발계획을 위한 신뢰도기준인 LOLE=0.5[일/년]에 해당하는 공급예비율에 대한 재분석은 그 어느 때보다 중요하다고 판단된다. 특히, 우리나라에서와 같이 용량가격제(CBP) 시장모델을 채택하는 나라에서는 전력시장계획 및 운영자의 입장에서 중요한 연구대상이다. 그러나 사실 적정 공급예비력의 정확한 값을 찾아내기는 어렵다. 그 이유 중 하나는 전원개발계획시 채택하고 있는 신뢰도 기준은 확률론적 개념에서 추정된 것이며 CBP시장에 대한 설정기준은 확정론적이기 때문이다. 그러므로 이들의 상관성을 살펴보고 분석하는 것은 앞으로 중요할 것으로 사료되며 이번에는 기초연구로써 송전계통을 고려하지 않은 HLI(Hierarchical Level I)수준에서 둘의 상관성을 모의 방법으로 살펴보기로 한다. 이를 위해서는 빠르면서도 정확한 알고리즘에 기반을 둔 확률론적 신뢰도 지수 및 발전비 산정이 가능한 발전시뮬레이션을 필요로 한다. 현재까지 HLI 수준에서 개발된 방법은 45년 전부터 수 많은 연구가 진행되었으며 Booth-Baleriaux법, 등가에너지함수법 및 Segmentation법 등과 같은 완전해석적 방법과 Cumulant법, MONA(Mixture of Normals Approxim- ation)법과 같은 근사해석적방법으로 대별될 수 있다. 본 연구에서는 상승적분과정이 타 방법보다 계산속도면에서 뿐만 아니라 정확도면에서도 보다 우수한 방법으로 평가되고 있고 나아가 에너지제약조건을 가지고 있는 수력발전기 및 양수발전기를 고려할 수 있어서 실 계통에도 적용 가능 한 고속 Hartley 변환을 이용한 모의 프로그램을 이용하여 우리나라 2008년도의 확률론적 신뢰도 지수인 LOLE와 결정론적 신뢰도 지수인 SRR과의 상관성을 추정하여 보았다.

2. 신뢰도 지수

그림 1.(a)에서의 실 계통은 그림 1.(b)처럼 등가화 할 수 있다. 전력계통내에 용량C_i(MW)와 사고율(FOR; Forced Outage Rate) q_i인 i^{th}발전기가 존재한다는 것은 원래 부하에 i^{th}발전기의 용량 C_i(MW)를 가지고 FOR은 0인 가상부하가 존재한다는 것과 동일하다. 이때 확률적 계통부하와 발전기 사고에 기인한 확률적 사고부하를 합하여 유효부하라 정의하며 이의 확률변수를 정식화하면 식(1)과 같다.



(a) 실계통 (b)등가화한 계통

그림 1. 실계통과 등가화한 계통

$$x_e = x_L + \sum_{i=1}^{NG} x_{oi} \tag{1}$$

단, x_e : 유효부하 확률변수
x_L : 확률적 계통부하의 확률변수
x_o : i 번째의 발전기에 의한 확률적 사고부하의 확률변수
NG : 발전기의 총 개수

즉, i 번째 발전기 까지 상승적분된 ELDC의 확률분포함수 $\Phi_i(x_e)$는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\Phi_i(x_e) &= \Phi_{i-1}(x_e) \otimes f_{oi}(x_{oi}) \\ &= \int \Phi_{i-1}(x_e - x_{oi}) f_{oi}(x_{oi}) dx_{oi}\end{aligned} \tag{2}$$

부하가 설비용량을 초과하는 양의 기대치인 공급지장전력량의 기대치를 '$\in(L_d)$' 라 한다면 이는 식 (3)처럼 된다.

$$\begin{aligned}\in(L_d)_{NG} &= \int_{IC}^{IC+L_d} (x - IC)\,\Phi(x) dx \\ &= \int_{\Phi^{-1}(x)}^{1} (x - IC)\, d\Phi^{*}(x) \\ &= \int_{\Phi(IC)}^{0} (x - IC)\, d\Phi(x) \\ &= \int_{0}^{?} d\left[(IC - x)\Phi(x)\right] + \int_{IC}^{IC+L_d} \Phi(x) dx \\ &= \int_{IC}^{IC+L_d} \Phi(x) dx\end{aligned} \tag{3}$$

그러므로 우선순위에 의해 i 번째 발전기부터 NG 발전기까지 상승적분하여 구한 유효부하확률분포함수 $\Phi_{NG}(x)$를 이용하여 신뢰도 지수 LOLE를 식(4)와 같이 정식화 할 수 있다.

$$LOLE = \Phi_{NG}(x)\big|_{x=IC} = f(\Phi_o, C_i, FOR_i) \quad (4)$$

한편, 결정론적 신뢰도 지수인 SRR은 식(5)와 같이 정의된다.

$$SRR = \frac{\sum C_i - L_p}{L_p} \times 100 = g(C_i, L_p) \quad (5)$$

그러므로 이 둘의 차이점은 부하곡선 및 발전기의 FOR의 고려 유무에 있음을 알 수 있다. 즉, 수학적 해석방법으로는 LOLE와 SRR의 상관관계성을 찾는 것이 불가능 하다. 본 연구에는 시뮬레이션 방법을 이용하여 이 둘의 상관성을 살펴보기로 한다.

3. 고속 Hartley 변환을 이용한 발전기 운전모의

3.1 ELDC 작성

임의의 함수 $f_1(x)$와 $f_2(x)$의 상승적분을 $f(x)$라 하면 이는 식(6)과 같이 정식화 된다.[7]

$$f(x) \equiv f_1(x) \otimes f_2(x) \equiv \int f_1(x) f_2(x - x')dx \quad (6)$$

이때 다음식이 성립한다.

$$H(v) = [H_1(v)H_2(v) - H_1(N-v)H_2(N-v) + H_1(v)H_2(N-v) + H_1(N-v)H_2(v)]/2 \quad (7)$$

여기서, H(v), $H_1(v)$, $H_2(v)$ 는 각각 $f(x)$, $f_1(x)$, $f_2(x)$의 Hartley 변환이다. 이의 상승적분정리를 이용하면 ELDC의 확률분포함수 $\Phi_i(x)$를 식(8)과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\Phi_i(x) = FHT^{-1}[H_{i-1}(v)T_{ie}(v) + H_{i-1}(N-v)T_{io}(v)] \quad (8)$$

3.2 원자력 및 화력발전기

원자력발전기의 연료비특성이 화력발전기와 동일하므로 함께 취급할 수 있다. 우선 주어진 역부하지속곡선의 확률분포함수 $\Phi_o(x)$로부터 그 Hartley변환 Ho(v)를 구하고 발전기의 우선순위를 작성한다. $H_{1-i}(v)$로부터 (i-1)번째 발전기까지 상승적분된 ELDC인 $\Phi_1(x)$를 식(9)와 같이 구할 수 있다.[8]

$$\Phi_{i-1}(x) = N^{-1/2}\sum_{x=1}^{N-1} H_{i-1}(v)\{\cos(2\pi vx/N) + \sin(2\pi vx/N)\} \quad (9)$$

i번째 발전기의 사고용량 확률밀도함수 $f_{oi}(x)$를 세우고 그 Hartley변환 $T_i(v)$를 구한다. 식(10)에 따라 $T_i(v)$와 $H_{1-i}(v)$의 상승적분을 나타내는 $H_i(v)$를 계산한다.

$$H_i(v) = H_{i-1}(v)T_{ie}(v) + H_{i-1}(N-v)T_{io}(v) \quad (10)$$

이제, 이를 역변환 한 후에 식 (4)를 이용하여 LOLE를 구할 수 있다.

3.3 수력발전기

수력발전기의 일반적인 운전모의는 그 설정된 발전량 만큼, 경제적 우선순위의 역순으로 화력발전기의 발전량을 감소시킴으로써 이루어진다. 그러므로 ELDC의 $\Phi_i(x_e)$가 역상승적분 되어져야 한다. 이는 고속Hartley변환에서 식(11)를 이용하면 ELDC를 역상승적분 할 수 있다.[9]

$$\Phi_{i-1}(x) = FHT^{-1}\left[\frac{H_{ie}(v)T_i(N-v) + H_{io}(v)T_i(v)}{T^2_{ie}(v) + T^2_{io}(v)}\right] \quad (11)$$

용량 C_H인 수력발전기의 총발전량 E_H는 미리 설정되는 것으로 하여 운전모의를 할 수 있다. 우선 i=NG로 하고 식(12)처럼 i번째 화력발전기의 발전 감소량 ED_{Hi}를 계산한다.

$$ED_{Hi} = E_{i1} - (pE_{i2} + qE_{i3}) \quad (12)$$

수력발전기의 발전량과 화력발전기의 총 감발량이 같아야 하므로 이의 제약조건인 식(12)이 성립하는지를 검토하고 성립되지 않으면 i=i-1로 한 후 식(10)를 재검토하고 성립되면 i지점이 수력발전기의 최적부하 담당지점이 된다.

3.4 양수발전기

양수발전기는 크게 경제양수발전과 강제양수발전으로 나눌 수 있다. 강제양수량 TE_{cp}를 식(14)과 같이 구할 수 있다.[10]

$$TE_{cp} = \min\{E_{cp}, PG_{\max}/\eta_{pg}\} \quad [MWh] \quad (13)$$

경제양수발전량은 에너지를 저장시키기 위해서 발전량을 증가시켜야하는 발전기의 발전한계비용과 양수발전으로 인하여 감소되는 화력발전기의 발전한계비용이 같아지는 지점에서 결정된다. 이는 다음식과 같은 최적화 문제로 볼 수 있다.

$$\min Z = \left|\sum_{i\in\epsilon p} \Delta E_{pi}\eta_{pg} - \sum_{i\in\epsilon p} \Delta E_{gi}\right| \quad (14)$$

3.5 흐름도

고속 Hartley 변환을 이용한 발전량 및 신뢰도 지수를 계산 하는 전체적인 흐름도는 그림 2와 같다.

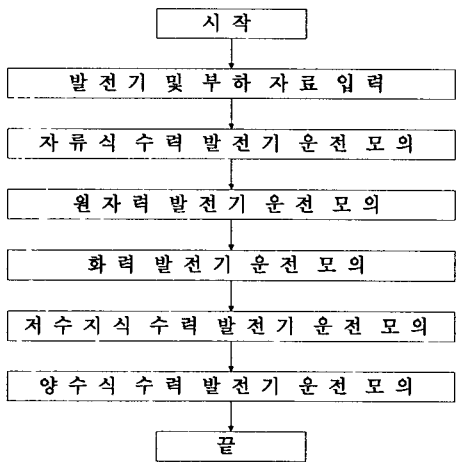


그림 2. 고속 Hartley 변환을 이용한 신뢰도 평가 발전시뮬레이션의 전체적인 흐름도

4. 사례연구

본 연구에서는 LOLE와 SRR의 상관관계성을 알아보기 위해 제3차 전력수급기본계획에서 2008년도에 대한 자료를 참고로 하였다. 수력 및 양수 발전기를 제외한 총 발전기 수가 189대이고 총 설비용량이 78,558[MW]인

실규모 계통을 대상으로 모의를 실시하였다. 수력발전기는 용량이 1,516[MW]이고 발전기 사고율(FOR) 및 연간 설비이용률은 각각 0.04297 및 20[%]인 한 대의 등가발전기로 설정하였고, 양수발전기도 용량이 3,900[MW]이고, 종합효율이 70[%], 상부저수지의 용량이 12,000[MWh]인 한 대의 등가발전기로 설정하였다. 전술한 바와 같이 SRR은 부하 최고치와 설비용량을 변수로 가지며 LOLE는 부하 최고치, 설비용량, FOR을 변수로 가지므로 본 연구에서는 각각의 변수들을 변화 시키면서 그림 2와 같은 순서로 운전모의를 하였다.

먼저, 그림 3은 부하 최고치를 70,000에서 60,000[MW]로 1,000[MW]씩 감소시키면서 SRR을 구하고 각각의 SRR에 대한 LOLE의 값을 구한 것이다. 여기서 LOLE 기준을 12[시간/년]으로 가정하였을 때 이 기준을 만족하는 SRR은 약 13.3[%]정도인 추정된다.

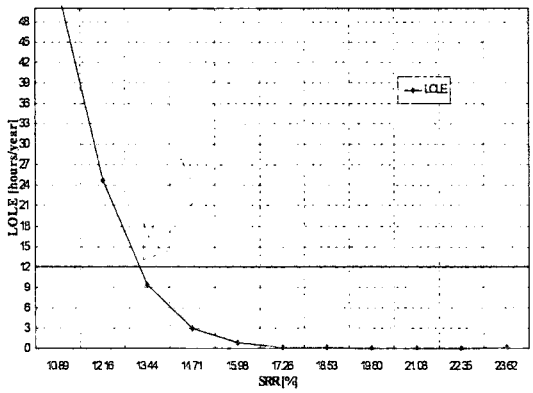


그림 3. 부하 변동에 따른 공급예비율과 LOLE의 변동

다음으로, 그림 4는 발전기를 한 대씩 탈락 시키면서 즉, 설비용량을 변화시키면서 SRR과 LOLE의 변동을 살펴본 것이다. 이때의 적정 SRR은 약 14.1[%]정도인 것으로 보인다.

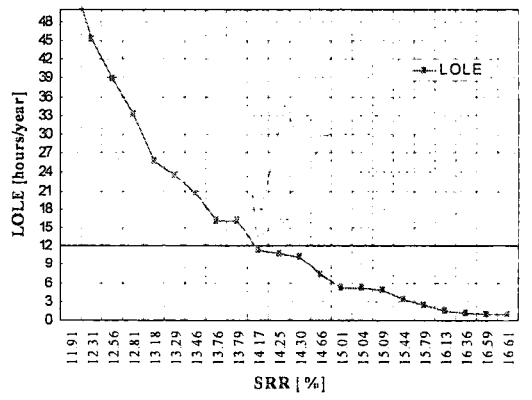


그림 4. 발전기 운전대수에 따른 공급예비율과 LOLE의 변동

세 번째로, 그림 5는 원자력 발전기의 사고율(FOR)을 0[%]에서 100[%]까지 변화시키면서 SRR과 LOLE의 변동을 나타낸 것이다. 여기서 원자력 발전기의 사고율이 두 배로 증가하면 여기서 가정한 LOLE 기준을 만족하기 위해서는 SRR이 13.3[%]에서 15.98[%]로 증가 되어야 함을 알 수 있다. 즉, 원자력사고율과 계통전체의 SRR과의 탄성치는 다음과 같음을 보여준다.

$$\frac{\Delta SRR}{\Delta FOR} = \frac{2.68}{100} \qquad (16)$$

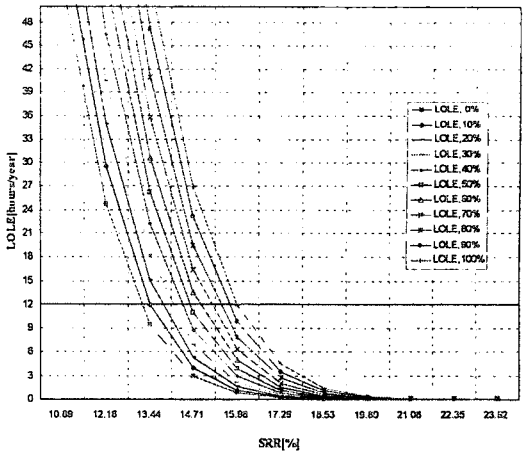


그림 5. 원자력 발전기의 사고율 변동에 따른 공급예비율과 LOLE의 변동

5. 결 론

본 연구에서는 고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적인 신뢰도 평가 모의방법을 사용하여 LOLE를 도출하고 그 변수들의 변동에 따른 각각의 SRR을 도출 하였다. 또한 LOLE 기준을 만족하는 적정 SRR을 선정할 수 있음을 보였다. 이러한 결과들은 전력수급계획시 유용한 가이드로써 설비용량의 부족이나 과잉투자를 방지하는 역할을 할 수 있으며 또한 발전용량 가격선정시 유용하게 사용 될 수 있다. 우리나라는 현재 발전기의 설비 용량에 따른 발전 용량 가격을 선정하는 용량기격(ICAP) 방식을 이용하고 있지만 ICAP방식은 발전기의 운전 여부에 상관없이 설비용량만으로 가격을 지불하는 등의 미흡한 점을 보이고 있다. 현재 이를 보안하기 위한 연구의 필요성이 대두되고 있으며 본 연구에서 보여주는 LOLE와 SRR의 관계성에 의해 적정 SRR을 도출하는 방법은 발전용량 가격선정시 보다 합리적인 발전용량 가격선정에 기여 할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 최재석, "확률론적 발전시뮬레이션을 위한 효율적인 앨고리즘", 고려대학교 공학박사학위 논문 1990,7.

[2] J.P. Stremel, R.T. Jenkins, R.A. Babb, and W.D. Bayless, " Production Costing Using the Cumulant Method of Representing the Equivalent Load Curve ", IEEE, Vol.PAS-99,No.5,pp.1947-1956,1980.

[3] D.J. Levy and E.P. Kahn, " Accuracy of the Edgeworth Expan-sion of LOLP Calculations in Small Power Systems ", IEEE, Vol.PAS-101, pp.986-996, April, 1982.

[4] H.T. Yang, etc, " Recursive Approach to Cumulant Method for Production Simulation and Derivatives Calculation ",8th Symposium on Electrical Power Engineering, China, 1987.

[5] D. Sutanto, Y.B. Lee, " Probabilistic Power System Production Cost and Reliability Calculation By the Z-Transform ", IEEE, Vol.4, Dec., 1989.

[6] R.L. Sullivan, " Power System Planning ", McGraw-Hill,1977.

[7] R.N. Bracewell, " The Hartley Transform ",Oxford University Press, 1986.

[8] 송 길영, 최 재석, 김 용하, "고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적 발전시뮬레이션에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 39-42-2, pp.341-348,1990,4.

[9] G. Cote, L. Lafond, " A Fast Production Scheduler for Generation Expansion Planning in a Hydro-Thermal System " , IEEE, Vol. PWRS-2, No.1, Feb., 1987.

[10] 제3차 전력수급기본계획, 산업자원부, 2006,12.