

PLF(Probabilistic Load Flow)를 이용한 모선 전압 안전도 평가

이 승 혁, 정 창 호, 김 진 오, 김 태 균, 추 진 부  
 \* 한양대학교, \*\* 한국전력공사 전력연구원

Security Assessment for Bus Voltages Using Probabilistic Load Flow

Seung-Hyuk Lee\*, Chang-Ho Jung\*, Jin-O Kim\*, Tae-Kyun Kim\*\*, Jin-Bu Choo\*\*  
 \* Hanyang University, \*\* KEPRI

**Abstract** - Probabilistic Load Flow(PLF) solution based on the method of moments is used for security assessment of bus voltages in power systems. Bus voltages, line currents, line admittances, generated real and reactive power, and bus loads are treated as complex random variables. These complex random variables are known in terms of probability density functions (PDF). Also, expressions for the convolutions of complex random variables in terms of moments and cumulants have been derived. Proposed PLF solution using the method of moments is fast, because the process of convolution of various complex random variables is performed in moment and cumulant domain. Therefore, the method is applied to security assessment of power systems in this paper.

Finally, system operator also can be used information of security assessment to improve reliability of power systems.

1. 서 론

본 논문은 moment를 이용한 확률적 load flow(PLF)로 전력계통의 각 모선 전압 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다. 전력 조류를 계산할 때 모선 전압, 선로의 전류, 선로의 어드미턴스, 발전된 유효전력 및 모선의 부하는 모두 각 전력계통 상황에서의 복소 확률변수(CRV: Complex Random Variables)이다. 또한, 이러한 임의의 복소 변수는 각 전력계통 상황의 확률 밀도 함수(PDF)로 표현될 수 있다. 모선 전압과 선로 전류의 확률 밀도 함수는 moment와 cumulant를 이용하여 구현이 가능하며 대수학적 확률 연산을 할 수 있다. 따라서, 이러한 moment와 cumulant의 장점을 이용하여 계통의 현 상태를 보다 정확히 판단할 수 있는 PLF를 제안하는 바이다. 기존의 결정론적인 전력조류 계산기법은 계통의 한 순간에 대한 전력조류 값을 출력으로 보여준다. 이러한 결정론적 조류 계산의 결과값은 확률적으로는 평균값(Mean Value)을 의미한다. 반면 PLF를 이용하여 전력조류를 계산하면 계통운영자는 과거의 상태, 즉 선로나 발전기 등의 각 요소에 대한 고장율, 상정사고 등을 고려하여 조류를 계산함으로써 신뢰도 여유, 계통 운영적 측면에서의 경제성 등의 제약조건을 고려한 계통 운영을 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 Complex Random Variables(CRV)

우선 확률 밀도 함수(PDF)  $f(Z)$ 를 가진 복소 확률변수(CRV)를 식 (1)과 같이 정의하자.

$$Z = X + jY \tag{1}$$

여기서  $X$ 와  $Y$ 는 같은 확률 공간의 실수로 정의된다.

또한, 복소수  $Z$ 를 크기와 각으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$Z = R e^{j\theta} \tag{2}$$

이와 같은 각 CRV는 그림 1과 같이 이산적인 PDF로 나타낼 수 있다. 그림 1의 PDF는 3개의 CRV로 구성되어 있다. 각 CRV의 확률을  $p_1, p_2, p_3$ 라고 하면 결국  $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ 이 된다.

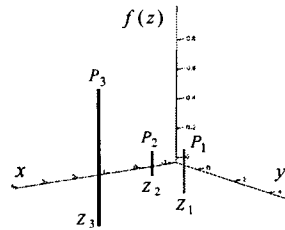


그림 1. CRV의 이산적인 확률밀도함수

2.2 CRV의 momets와 cumulants 계산

그림 1에서 임의의 복소변수(CRV)  $Z_i$ 의  $t$ 차 moment는 식 (3)과 같다.

$$m_t = E[Z^t] = \sum_{i=1}^3 Z_i^t P_i \tag{3}$$

여기서,  $E[\cdot]$ 는 확률변수의 기대치이다. 그러므로 그림 1과 같은 PDF의 4차까지의 각 moment는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_1 &= Z_1 P_1 + Z_2 P_2 + Z_3 P_3 \\ m_2 &= Z_1^2 P_1 + Z_2^2 P_2 + Z_3^2 P_3 \\ m_3 &= Z_1^3 P_1 + Z_2^3 P_2 + Z_3^3 P_3 \\ m_4 &= Z_1^4 P_1 + Z_2^4 P_2 + Z_3^4 P_3 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)의 각 차수 moment는 복소수이다. 이 moment를 이용하여 moment와 cumulant의 관계로부터 4차까지의 cumulant를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} k_1 &= m_1 \\ k_2 &= m_2 - m_1^2 \\ k_3 &= m_3 - 3m_2 m_1 + 2m_1^3 \\ k_4 &= m_4 - 4m_3 m_1 + 6m_2 m_1^2 - 3m_1^4 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (6)은 식 (5)의 cumulant를 다시 moment로 변환한 관계식이다.

$$\begin{aligned}
 m_1 &= k_1 \\
 m_2 &= k_2 + k_1^2 \\
 m_3 &= k_3 + 3k_2k_1 + 2k_1^3 \\
 m_4 &= k_4 + 4k_3k_1 + 3k_2^2 + 6k_2k_1^2 - 3k_1^4
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

이러한 moment와 cumulant의 관계식은 확률의 대수학적 연산에 있어 유용하게 사용되기 때문에 중요하다. 즉, moment는 확률의 곱셈에 cumulant는 덧셈에 이용되기 때문이다.

### 2.3 확률적 전력조류 계산(PLF)

일반적인 결정론적 조류계산은 특정 상태에 있는 계통의 정적 시뮬레이션이라고 할 수 있다. 이때 입력되는 정보는 부하 모션의 유, 무효전력 수요와 발전기 버스의 유효전력 출력 및 전압 크기이며, 기존의 결정론적 조류계산 기법은 입력 정보에 따라 하나의 결과만을 얻을 수 있으며 만일 부하, 발전기 출력이나 선로의 고장으로 인한 계통 상태에 변화가 생긴다면 변화된 계통 상태에 따른 정보를 입력하여 조류계산을 다시 수행하여야 한다. 반면 PLF를 이용하여 전력조류를 계산하면 계통운영자는 과거의 상태, 즉 선로나 발전기 등의 각 요소에 대한 고장율, 상정사고 등을 고려하여 조류를 계산함으로써 신뢰도 여유, 계통 운영적 측면에서의 경제성 등의 제약 조건을 고려한 계통 운영을 할 수 있다.

그림 2는 PLF의 알고리즘 순서도이다.

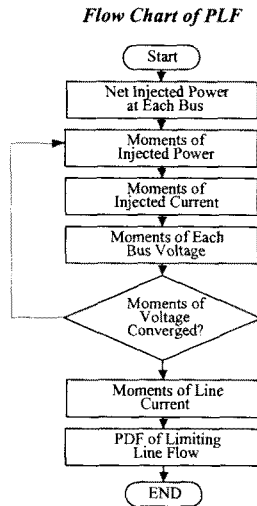


그림 2. PLF의 알고리즘 순서도

계통의 모션 전압 안전도를 평가하기 위해 계통 각 요소의 현재 운전의 불확실성과 과거 데이터로부터의 고장실적을 이용한 PLF를 실행한다 [1].

Step I) 모션 전압(V)의 moment를 구한다.

- 복소전력  $I \cdot V^* = S^*$ 으로부터  $m_t(I) = m_t(S_t^*) / m_t(V_t^*)$ 를 구한다. 여기서  $t=1 \sim 4$ 로 moment의 차수를 의미하고,  $V^*$ ,  $S^*$ 는 이미 알고 있는 모션 전압과 복소전력을 각각 의미한다.

- 선로 데이터를 이용하여 어드미턴스 행렬( $Y_{bus}$ )을 구한다.

- 어드미턴스 행렬의 moment를 구한다. 이때 각 선로와 모션의 과거 고장실적, 즉 고장율을 입력한다.

- 임의의 모션  $k$ 로 유입되는 전류는 식 (7)과 같다. 여기서  $Y_{kk}$ 는 어드미턴스 행렬의 대각요소이고,  $Y_{ki}$ 는

비대각 요소이다.

$$I_k = Y_{kk} V_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n Y_{ki} V_i \quad (7)$$

위의 식 (7)로부터 유도한 cumulant를 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$k_k[Y_{kk} V_k] = k_k[I_k] + k_k \left[ \sum_{i=1, i \neq k}^n (-Y_{ki}) V_i \right] \quad (8)$$

-  $Y_{kk} V_k$ 의 cumulant,  $k_k[Y_{kk} V_k]$ 를 계산하여 moment  $m_k[Y_{kk} V_k]$ 를 구한다.

- 또한 모션 전압의 moment,  $m_k[V_k]$ 는 식 (9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$m_k[V_k] = m_k[Y_{kk} V_k] / m_k[Y_{kk}] \quad (9)$$

Step II) 반복과정

- Step I의 과정을 반복하여 허용오차 범위를 만족시키는  $m_k[V_k]$ 를 결정한다.

- 모션 전압의 moment  $m_k[V_k]$ 에서 cumulant  $k_k[V_k]$ 를 계산한다.

Step III) 최종 계산된 모션 전압의 cumulant는 이산적인 값이기 때문에 이를 연속적인 값인 PDF로 근사화시키는 기준에 연구된 방법에는 Gram-Charlier Expansion과 Legendre Series가 있다 [2].

본 논문에서는 그 중 Gram-Charlier Expansion의 Edgeworth 형태를 이용하여 PDF를 구현하였다.

Gram-Charlier Expansion은 다항식의 근사화 전개식이기 때문에 무한히 전개시킬수록 더 정밀한 PDF를 얻을 수 있지만 본 논문에서는 3번째 항까지만 전개하였다. 확률변수  $X$ 의 PDF  $f(x)$ 를 정규분포 확률변수  $z$ 와 이 변수의 PDF  $N(z)$ 를 이용하여 표현하면 식 (10)과 같이 표현된다.

$$f(x) = N(z) - G_1 N^{(3)}(z)/6 + G_2 N^{(4)}(z)/24 + G_3 N^{(5)}(z)/72 + \dots \quad (10)$$

여기서,  $z = (x - \mu) / \sigma$

$$\mu = k_1, \quad \sigma = k_2$$

$$N(z) = 1 / \sqrt{2\pi} e^{-z^2/2}$$

$$N^{(i)}(z) = d^i N(z) / d^i z$$

$$G_1 = k_3(X) / [k_2(X)]^{3/2}, \quad G_2 = k_4(X) / [k_2(X)]^2$$

Step IV) 결국 위의 Gram-Charlier Expansion을 이용하여 각 모션 전압의 정규분포(Normal Distribution)를 구할 수 있다. 보다 쉽게 정규분포를 누적분포(Cumulative Distribution)로 표현하면 운영하고자 하는 모션 전압레벨에 따라 PDF의 면적을 구함으로써 각 모션의 안전도를 평가할 수 있다.

각 모션에 대한 안전도 평가에 있어 고장실적(고장율)과 불확실성을 고려한 PLF를 이용하면 계통운영자가 현재 계통 상황에 맞는 전압레벨의 운영전략을 세울 수 있고, 또한 경제적 원칙에 입각한 계통 운영비용을 고려할 경우에 사용될 수 있다는 장점이 있다.

### 3. 사례 연구

본 논문에서는 PLF를 이용한 각 모션 전압의 안전도 평가를 위하여 그림 3의 RBTs IEEE-7 Bus System을 사용하였다. 표 1에 본 논문의 사례연구에서 사용된 각 선로와 모션의 고장실적(고장율)을 나타내었다. 여기서 4번 모션이 기준 모션이다.

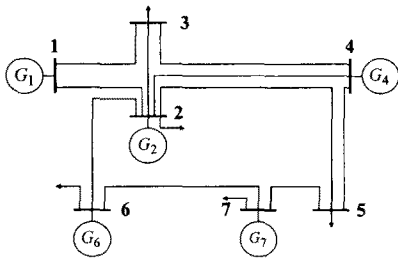


그림 3 사례연구의 RBTS IEEE-7 Bus System

표 1. 각 모선과 선로의 고장률

From Bus	To Bus	Failure Rate	Bus No.	Failure Rate
1	2	0.85	1	0.91
1	3	0.86	2	0.88
2	3	0.95	3	0.96
2	4	0.83	4	1
2	5	0.87	5	0.89
2	6	0.93	6	0.87
3	4	0.87	7	0.89
4	5	0.92		
6	7	0.89		
7	5	0.88		

표 2는 모의 계통인 RBTS IEEE-7 Bus System의 복소 확률변수를 이용한 PLF의 최종 계산된 각 모선 전압의 cumulant 값을 보여준다.

표 2. 복소확률변수를 이용해 계산된 각 모선 전압 cumulant

	1차	2차	3차	4차
1bus	0.8879+j0.3995	-0.0717-j0.0762	0.0219+j0.0800	0.0107-j0.0922
2bus	0.9619+j0.3495	-0.0980-j0.0803	0.0718+j0.1254	-0.0260-j0.1470
3bus	0.9058+j0.1369	-0.0980-j0.0403	0.0021-j0.0074	-0.0294-j0.0239
4bus	1.0000+j0.2011	0	0	0
5bus	0.9925+j0.2357	-0.1069-j0.0545	0.0985+j0.0830	-0.0795-j0.1075
6bus	0.9900+j0.4258	-0.0865-j0.0931	0.0649+j0.1782	0.0113-j0.1955
7bus	0.9952+j0.2882	-0.1020-j0.0638	0.0885+j0.1010	-0.0612-j0.1289

그림 4는 표 2의 각 모선 cumulant의 크기만을 계산하여 보여준다. 계산된 cumulant를 Gram-Charlier Expansion을 이용하여 PDF를 구하였다. 각 모선의 PDF 중 그림 5는 각 모선 전압의 PDF이다. 그림 6은 계산된 각 모선 전압의 PDF 중 3번 모선 전압의 정규분포 PDF를 누적분포로 표현한 것이다.

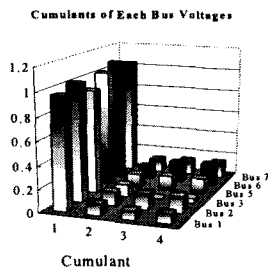


그림 4 각 모선 전압의 크기의 cumulant  $k_i [V]$

사례연구의 결과를 이용하여 모선 전압에 대한 안전도 평가 결과를 표 3에 나타내었다. 모선 전압 안전도는 가정된 계통상황하에서 0.98 [PU]에서 1.04 [PU]의 전압

기준을 가지고 운영 중이라는 가정으로부터 평가하였다.

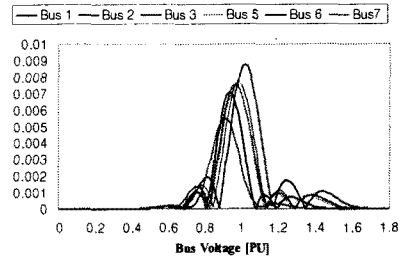


그림 5. 각 모선 전압의 PDF

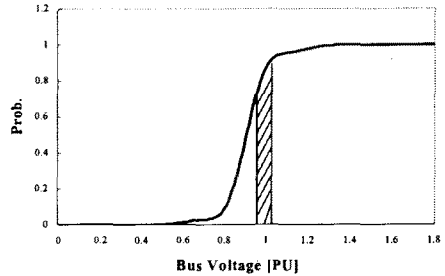


그림 6. 3번 모선의 누적 확률 분포

표 3. 0.98[PU]~1.04[PU]로 운영할 때 각 모선 전압의 Ranking

Rank(순위)	Probability(확률)	Bus Num.(모선번호)
1	0.1479206	3
2	0.2069756	1
3	0.2575106	2
4	0.2702186	5
5	0.2808845	6
6	0.2913969	7

표 3에서처럼 0.98 [PU]~1.04 [PU]의 전압레벨로 계통을 운영할 경우 송전선로와 모선의 과거 고장실적 등을 고려하여 3번 모선이 신뢰도 여유가 가장 적음을 알 수 있다. 그리고 기준 모선은 순위결정에서 제외하였다. 결국 7번 모선이 가장 안전도가 높음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 moment를 이용한 확률적 load flow(PLF)로 전력계통의 각 모선 전압 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다. PLF를 이용하여 전력조류를 계산하면 계통 운영자는 과거의 상태, 즉 선로나 발전기 등의 각 요소에 대한 고장률, 상정사고 등을 고려하여 조류를 계산함으로써 신뢰도 여유 및 안전도 평가하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 전력연구원의 지원에 의해 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S. Patra and R.B. Misra, "Probabilistic Load flow Solution using Method of Moments", IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, pp. 922-934, 1993.
- [2] J. O. Kim and C. Singh, "Comparative Study of Continuous-distribution Models for Power System Reliability Evaluation", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 5, September 1998.