

확률적 전력조류계산과 퍼지 전력조류계산과의 비교 연구

정영수, 심재홍, 김진오
한양대학교 전기공학과

Comparative study of Probabilistic Load Flow and Fuzzy Load Flow

Young Soo Jung, Jae Hong Shim, Jin O Kim
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract -This paper presents a generalized multi-parameter distribution method for the convolution of linear combination of random variables to calculate system load flow in a conventional probabilistic approach and also presents a conceptual possibilistic approach using fuzzy set theory to manage uncertainties. The probability distribution function is transformed into an appropriate possibilistic representation under the compromise between the transformation consistency and the human updating experience. The IEEE 25-bus system is used to demonstrate the capability of the proposed algorithm.

1. 서 론

전력계통분야에서 현재 적용되고 있는 결정적인 방법들은 전문가들의 경험으로 얻은 정량적인 지식들이 부족하기 때문에 적절하지 못하는 경우가 발생하는 데 퍼지집합이론은 이러한 문제를 다루는 해결책을 제시한다. 본 연구에서는 확률적 전력조류계산을 위해 상승적분(convolution)과, 계산시간의 과다로 인하여 상승적분이 유용하지 못한 대규모의 전력계통에 큐물런트(cumulant)와 모멘트대입 방법을 사용하여 상승적분에 의한 정확한 곡선을 근사화하였다. 또한 확률적인 정보에 대한 전문가의 경험과 일관성이론의 개념을 이용하여, 확률적 전력조류계산에서 각 모선의 부하량과 발전량의 입력을 나타내는 데에 사용되는 확률분포함수들을 사다리꼴 가능성 분포함수로 변환하여 퍼지 전력조류를 계산하였다. 이러한 퍼지 전력조류와 확률적 전력조류를 비교하기 위하여 IEEE 25 모선계통에 적용하여 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 확률적 전력조류

직류 전력조류계산에서 기본적인 확률적 전력조류의 선형화 공식은 식(1)과 같다.

$$P^L = A \times P^N \tag{1}$$

여기서 P^N 은 각 모선의 투입전력량을, P^L 은 선로의 전력조류를 나타내고 A 는 전력계통도에서 구한 민감도계수이다.

확률적 전력조류에서는 각 모선의 부하량과 발전량을 확률변수로 다루므로, 선로의 전력조류에 대한 확률분포함수를 구하기 위해서는 선형조합으로 이루어진 확률변수들(정규분포, 이항분포, 이산분포)을 상승적분해야 한다.

선로 k 에 흐르는 전력조류에 대한 확률분포함수는 $f(S_k)$ 는 식(2)으로 구할 수 있다.

$$f(S_k) = A_{k1}f_1(x) \cdots \cdots A_{kn}f_n(x) \tag{2}$$

여기에서 A_{kn} 은 민감도계수를 나타내고 $f_n(x)$ 는 n 번째 모선의 확률분포함수를 나타낸다.

대규모의 전력계통에서는 이산확률변수로 만들어지는 상태의 수가 지수적으로 증가하여 계산시간이 과도하게 증가하기 때문에 위의 상승적분과정은 효과적이지 않다. 본 연구에서는 큐물런트와 모멘트대입방법을 사용하였다. 선로의 전력조류에 대한 큐물런트는 민감도계수를 가진 입력확률변수들의 큐물런트의 합으로 구할 수 있고, 전력조류의 $2n$ 개의 선로모멘트는 $2n$ 개의 큐물런트에서 구할 수 있다. 선로의 확률분포함수는 모멘트대입방법에 의해 다변수분포함수의 $2n$ 개의 파라미터를 지닌 함수를 n 개의 선형조합으로 구할 수 있는데 본 연구에서는 Erlang함수를 사용하였다.

3 적합도를 이용한 가능성 분포함수

확률분포함수를 퍼지 전력조류에 응용하기 위해서는 가능성 분포함수로 바꾸어야 한다. 이 변환과정은 전문가의 경험을 바탕으로 얻은 계통에 관한 정보와 Zadeh가 제시한 확률과 가능성 분포간의 변환법[2]을 합성하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 사다리꼴 가능성 분포함수를 사용하였다. α -level이 1인 구간을 평균구간(mean interval), 0인 구간을 퍼짐구간(spread interval)이라고 정의하고, 얻어

진 평균구간과 퍼짐구간을 이용하여 퍼지전력조류를 구한다. 평균구간은 최대의 적합도(consistency)를 가지면서 가능성 분포함수 $\mu(x)$ 를 이루는 퍼지집합의 크기를 최소화하기 위한 최적화의 조건을 만족해야 한다. 최적화식은 식(3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \mu^2(x) dx \quad (3)$$

여기서 제한조건은 다음과 같다.

$$C - \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x) p(x) dx \leq 0, \quad (4)$$

$$0 \leq \mu(x) \leq 1$$

여기서 $p(x)$ 는 확률분포함수를 나타내고, C 는 변환의 적합도를 나타냄과 동시에 실제의 평균값이 가능성분포함수로 정의된 평균구간 내에 존재할 가능성을 나타낸다.

3.1 정규분포함수의 가능성 분포함수로의 변환

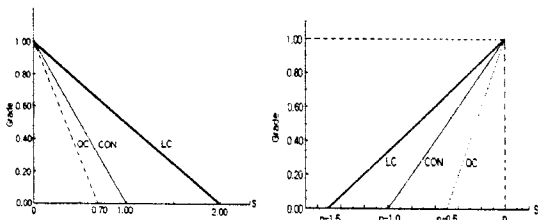
확률적 전력조류계산에서 부하모선인 경우 부하 예측에 대한 불확실성을 평균값과 분산을 갖는 정규분포함수로 가정한다. 식(3), 식(4)의 최적화 조건을 따르는 가능성 분포함수 $\mu(x)$ 는 식(5), 식(6)과 같다.

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp[-(S^2 - x^2)/2] & |x| > S \\ 1 & |x| \leq S \end{cases} \quad (5)$$

$$C = (2/\pi)^{1/2} [\exp(S^2/2) \int_S^{\infty} \exp(-x^2) dx + \int_0^S \exp(-x^2) dx] = F_{cx}(S) \quad (6)$$

여기서 S 는 $p(x)$ 의 표준편차이다.

가능성 분포함수에서의 넓은 평균구간은 실제 평균값의 위치에 대한 인간의 확신을 감소시키므로, 이를 보상하기 위하여 전문가의 경험을 바탕으로 해석하고자 하는 계통에 대한 정보의 정확한 정도를 확신레벨로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 주어지는 QC(Quite Confident), CON(Confident), LC(Less Confident)의 세 가지 형태의 확신레벨을 사용하였다.



(가) 정규분포

(나) 이항분포

그림 1. 정규분포와 이항분포 ($n \leq 5$) 확신레벨

그림 1(가)에 나타난 정규분포에 대한 3개의 확신레벨을 식으로 표현하면 식(7)과 같이 나타낼 수

있고, S_{Nmax} 는 표1에 나타나 있다.

$$F_{CON}(S) = \begin{cases} \frac{S_{Nmax} - |S|}{S_{Nmax} - S_{Nmin}}, & S_{Nmin} \leq |S| \leq S_{Nmax} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

평균구간의 상, 하한치는 그림 1(가)의 확신레벨의 함수와 식(6)의 함수가 만나는 점에서 구할 수 있고, 퍼짐구간의 상, 하한치는 표1에서 구할 수가 있다.

표 1. 3가지 확신레벨에 따른 S-파라미터

	분포형태	QC	CON	LC
S_{Nmax}	정규분포	0.7	1.0	2.0
	이산분포	1.0	2.0	3.0
S_{Bmin}	이항분포($n \leq 5$)	0.5	1.0	1.5
	이항분포($n > 5$)	0.8	1.6	2.4
S_{Bmin}	이산분포($n \leq 5$)	1.0	1.5	2.0
	이산분포($n > 5$)	1.6	2.4	3.2

3.2 이항분포함수의 가능성 분포함수로의 변환

발전기모선인 경우에는 발전기의 수와 이의 고장정지율로 갖는 이항분포함수로 나타낼 수 있다. 실제로는 발전기의 출력이 이항분포를 만족할 수 없기 때문에 식(8)과 같은 수정된 확률지수분포함수를 사용하여 이항분포의 근사화로 나타낼 수 있다.

$$f(r) = \begin{cases} K \exp[-K(n-r)], & r \leq n \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $K = \binom{n}{r} (1-q)^r q^{n-r}$, $r = n$ 이고, n 은 발전기의 총 수이고, r 은 동작하고 있는 발전기의 개수이다. 정규분포함수와 비슷하게 가능성 분포함수 $\mu(r)$ 와, C 와 S 의 관계를 구할 수 있다. 이항분포의 변환과정에서는 S 는 동작하고 있는 발전기의 개수를 나타낸다.

$$\mu(r) = \begin{cases} \exp[K(r-S)], & r \leq S \\ 1 & S \leq r \leq n \end{cases} \quad (9)$$

$$C = 1 - (1-K) \exp[-K(n-S)] = F_{cb}(S)$$

이항분포에서의 평균구간은 식(10)에서 구할 수 있다. 식(10)의 그림은 그림 1(나)에 나타나 있다.

$$F_{CON}(S) = \begin{cases} \frac{S - (n - S_{Bmin})}{S_{Bmin}}, & n - S_{Bmin} \leq S \leq n \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

여기서 S 는 평균구간의 하한치를 나타내고, S_{Bmin} 과 퍼짐구간의 하한치는 표1에서 구할 수 있다. 퍼짐구간의 상한치는 발전기용량의 한계치를 고려해야만 한다. 발전한계허용치를 발전기용량의 5%라고 한다면, 퍼짐구간의 상한치는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{CON}(S) = \begin{cases} \frac{(1+0.05 S_{Bmax})n - S}{(1.05 S_{Bmax} - 1)n}, & n \leq S \leq 1.05n \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (11)$$

여기서, S_{Bmax} 는 QC, CON, LC에 따라 각각 1/3, 2/3, 1이다.

3.3 이산분포함수의 가능성 분포함수로의 변환

이산분포의 변환은 모선이 부하모선이나 발전 기모선이나에 따라 정규분포나 이항분포의 변환기법을 따른다. 그러나 이산분포는 넓은 평균구간과 퍼짐구간을 지닌다.

4. 퍼지 전력조류계산

각 모선의 사다리꼴 가능성 분포함수의 평균구간의 평균값을 사용하여 기존의 전력조류 계산방법을 이용하여 각 선로의 전력조류 P^L 를 구한다. 각 모선에 투입된 전력량에 대한 평균구간의 평균값에서 네 개의 파라미터에 대한 편차 ΔP^N 를 구한다. 식(12)와 같이 ΔP^N 와 전력계통도에서 구한 민감도계수 A 를 이용하여 선로에 대한 전력조류에 대한 편차 ΔP^L 를 구할 수가 있다.

$$\Delta P^L = A \cdot \Delta P^N \quad (12)$$

각 선로의 전력조류는 기존의 전력조류계산에 의해 구한 P^L 와 각각의 편차 ΔP^L 를 더한 것과 같다. 이를 식으로 표현하면 식(13)과 같다.

$$P^L = P^L + \Delta P^L \quad (13)$$

5. 사례연구

5.1 확률적 전력조류계산의 결과

확률적 전력조류계산은 상승적분을 한 확률분포함수와, 6, 8, 10개의 파라미터를 갖는 함수를 모멘트대입방법을 이용하여 Erlang함수의 선형조합으로 구한 후 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서 상승적분에 의한 정확한 곡선과 Erlang함수에 의한 곡선이 거의 비슷한 모양으로 근사화됨을 알 수 있다.

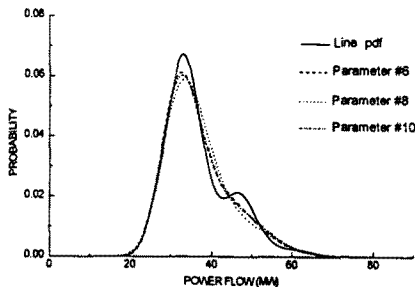


그림 2. 선로1-6에 대한 확률분포곡선

5.2. 퍼지 전력조류계산의 결과

선로1-6에 대한 3가지 확신레벨에 대한 퍼지전

력조류는 그림 3과 같다. 확률적 전력조류계산방법은 선로의 전력조류 분포곡선이 굴곡이 심하거나 퍼짐이 심한 경우에 선로의 전력조류를 평균값이나 분산으로 명확히 나타낼 수 없었으나 퍼지 전력조류계산방법은 중앙값들이 위치하는 구간을 빠르고 쉽게 구할 수가 있었다.

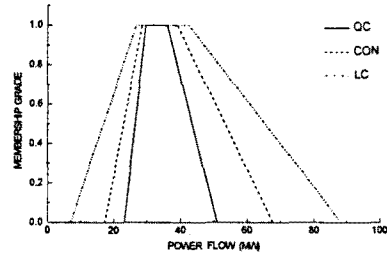


그림3. 선로1-6에 대한 가능성분포함수

6. 결 론

대규모의 전력계통에서 확률적 전력조류계산시 상승적분에 의한 방법은 이산함수로 인해 상태가 지수적으로 증가하여 과도한 계산시간의 부담이 생긴다. 그러나 큐폴런트를 이용한 모멘트대입방법은 계산시간의 부담을 줄이고 정확하고 효과적으로 전력조류의 분포곡선을 얻을 수 있음을 확인하였으며, 퍼지 전력조류계산은 빠르고 쉽게 중앙값이 위치하는 전력조류를 구할 수가 있었고 전문가의 경험에 의한 계통의 정보도 고려할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] V.Miranda, M.A.C.C.Matos, J.T. Saraiva, "Fuzzy Load Flow-New Algorithm Incorporating Uncertain Generation And Load Representation," *10th PSCC* pp.621-627, 1990.
- [2] L.A.Zadeh, "Fuzzy Sets As a Basis for a Theory of Possibility," *Fuzzy Sets and Systems Vol. 1.* pp.3-28, 1978.
- [3] B.Borkowska, "Probabilistic Load Flow," *IEEE Trans. Vol. PAS-93,* pp.752-759, 1974.
- [4] J.M.Ling, C.E.Lin, C.L.Huang, "Investigation of Fuzzy Real Power Flow Modelling With Probabilistic-Heuristic Based Information," *Elec. Power Systems Research, Vol. 32.* pp.175-186, 1995.
- [5] R.N.Allen, C.H.Grigg, M.R.G, Al-Shakarchi, "Numerical Techniques in Probabilistic Load Flow Problems," *Int. J. Numer. Methods Eng. Vol. 10.* pp.853-860, 1976.