

발전량 증가 패턴을 고려한 송전 손실 배분 방법

문형준*, 민경일** 문영현*
연세대학교*, 삼성전자 반도체사업부**

Transmission Loss Allocation Considering Generation Increasing Patterns

Hyung-Jun Moon*, Kyung-Il Min**, Young-Hyun Moon*,
Yonsei University*, Samsung Electronics**

Abstract - 송전손실 배분에 대한 방법 중에서 발전 증가 패턴에 따른 방법을 제시하였다. 손실 감도 계산을 통하여 모선별 계통 손실을 구한다. 기저점에서 동작점으로 증가해 갈 때의 송전 손실 배분에 대해서 공정하게 할 수 있는 알고리즘이다. 모선별 계통 손실은 적분 경로에 따라 달라지게 되고, 이에 따라 어떻게 달라지는 지 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.

1. 서 론

현재 전세계적으로 진행 중인 경쟁적 전력 시장은 독점적 전력 시장 체계 때에는 관심 없었던 ‘송전 손실 배분(TLA; Transmission Loss Allocation)’이라는 새로운 주제에 관심을 갖게 해주었다. 송전 손실 배분(TLA)은 지역 한계 가격(LMP; Locational Marginal Price) 등의 비용에 영향을 주게 되고, 이런 영향으로 인한 불균등한 송전 손실 배분은 공정한 전력 시장의 경쟁을 저해할 수 있다. 이런 이유로 전력 시장의 개편과 더불어 다양한 송전 손실 알고리즘이 개발되었다.

초기의 송전 손실 알고리즘에서는 송전 손실의 비선형성으로 인해서, 실제 손실과 배분된 손실의 합 간의 큰 차이가 있었다. 현재는 많이 해결 되었으나 ‘경로에 의존한’ 손실 배분에 대한 부분은 잘 해결되지 않았다. 전체 송전 손실은 경로에 관계없이 일정하지만, 각각의 손실 배분은 차이가 생기게 된다. 이를 해결할 수 있는 방법이 선행 연구에서 개발되었고, 이 방법에는 경로 의존성을 고려한 이론적 분석을 하는 선적분 방법이 필요하다.

본 논문에서는 합리적인 손실 배분을 위하여 거래 전략에 따른 손실 배분 알고리즘의 합리적인 모델을 제시하였다. 실제로 모든 발전기는 발전 증가 패턴을 가지고 있으며 특히 원자력 발전과 같은 동작점(Operating Point)이 기저점(Base Point) 근처에 있는 유형도 발전 증가 패턴 중에 하나이다. 이러한 여러 가지 발전 증가 패턴이 손실 배분에 미치는 영향을 알아보고, 실제 원자력 발전과 같은 발전기에 적용할 수 있는 부분에 대하여도 고려하였다. 그리고 거래 전략에 따른 손실 배분 알고리즘에서의 특징인 경로의존성과 조류 계산에 의한 총 손실량의 값이 일정하다는 점이 발전 증가 패턴을 고려하여도 성립한다는 것을 입증하였다. 복잡한 거래 전략과 발전 증가 패턴을 간단히 하기 위하여 4 모선 계통을 통하여 시뮬레이션을 하였고, 기본적인 부하와 발전간 증가 패턴을 고려하여 다양한 적분 경로를 제안했다.

2. 본 론

2.1 발전 증가 패턴을 고려한 송전 손실 배분의 수학적 의미

발전 증가 패턴이란 거래 전략을 이용한 송전 손실 배분 알고리즘에서 동작점(Operating Point)과 기저점(Base Point)을 이용하여 수학적 적분 경로를 결정하는 것을 의미한다. 즉 발전기의 발전량이 어떤 경로를 가지고 증가하여 동작점에 이르는가를 결정하는 것이 발전 증가 패턴이다. 마찬가지로 부하가 증가하는 경로를 결정하는 것을 부하 증가 패턴이라고 할 수 있다.

2.1.1 손실 감도(Loss Sensitivity) 계산

일단 발전 증가 패턴의 수학적 의미를 알기 위한 기본 단계로 거래 전략에 따른 송전손실 배분 알고리즘에서 손실 감도 계산은 다음과 같이 계산된다.[3] 일반적으로 슬랙모선이 바뀌면 감도계수가 상당한 변화를 보이거나 여기에 쓰인 식 (3)으로는 슬랙 모선에 독립적인 손실 감도를 구할 수 있다.

$$S_{pGi}(\mathbf{P}) = \frac{\partial P_{Loss}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial P_{G,i}} \quad (1)$$

$$= \frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial P_{G,i}}$$

$$= \left[\left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] J^{-1}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_L^{(i)} \\ -\boldsymbol{\beta}_L^{(i)} \end{bmatrix}$$

단, \mathbf{u}_i : 발전기가 있는 i 번째 성분 원소가 1인 $(n-1) \times 1$ 의 단위 벡터
즉, $\mathbf{u}_i = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]^T$

$\boldsymbol{\alpha}_L^{(i)}$: i 번째 모선의 발전량 증가에 대응하는 유효부하 증가 배분비율 $(\alpha_{Lk}^{(i)})$ 을 원소로 하는 $(n-1) \times 1$ 의 벡터
(단, $\sum_{k=1}^N \alpha_{Lk}^{(i)} = 1$)

$\boldsymbol{\beta}_L^{(i)}$: i 번째 모선의 발전량 증가에 대응하는 무효부하 증가 배분비율을 원소로 하는 $(n-1-n_g) \times 1$ 의 벡터
즉, $\boldsymbol{\beta}_L^{(i)} = [\tan\theta_{L1}\alpha_{L1}^{(i)}, \tan\theta_{L2}\alpha_{L2}^{(i)}, \dots, \tan\theta_{LN}\alpha_{LN}^{(i)}]^T$
(단, $\theta_{L,i} = \cos^{-1}pf_i$, pf_i 는 i 모선의 부하 역률)

여기서 n 은 모선의 총 개수이고, n_g 는 슬랙을 제외한 발전기의 개수이다. 이상과 같이 유효전력을 독립변수로 한 손실 감도를 계산될 수 있다.

2.1.2 모선별 계통 손실

손실 감도를 사용하여 모선별 계통 손실 배분을 계산할 수 있다. 즉 모선 i 에 대한 계통 손실 배분은

$$P_{Loss(i)} = \int_c \int_{(0,0,\dots,0)}^{(P_1^0, P_2^0, \dots, P_n^0)} S_{pGi}(P_1, \dots, P_n) dP_{G,i} \quad (2)$$

이다. 여기서 모선 i 에 대한 계통 손실 배분은 경로 c 에 따라 다른 값을 가지게 된다. 즉 독립변수인 유효전력이 증가 경로가 적분경로 c 를 의미하여 유효 전력 P 의 증가 경로(적분 경로)가 모선 i 에 대한 손실 배분에 영향을 미치게 된다. 여기서 \mathbf{P} 의 증가 경로가 본 논문에서 제시한 발전 증가 패턴이다.

좀 더 쉬운 계산을 위하여 경로 상수 $\lambda \in [0,1]$ 로 정의하여 적분경로 c 를 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0 \lambda \quad P_{Li} = P_{Li}^0 \lambda \quad \mathbf{P} = \mathbf{P}^0 \lambda \quad (3)$$

위 식 (2)를 경로 상수 λ 를 이용하여 평균 손실 감도 계수를 구하면,

$$\overline{S}_{pGi} = \int_0^{\mathbf{P}^0} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{G,i}} dP_{G,i} = \int_0^1 S_{pGi}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

이다. 여기서 발전 증가 패턴은 경로 상수 λ 의 값(위치)에 따라 달라진다. 본 논문에서 알아보고자 하는 발전 부하 패턴을 이용한 송전 손실 배분에서는 이 경로 상수 λ 를 이용하여 손실 배분량을 계산하게 된다.

2.1.3 평균 손실 감도를 사용한 모선별 계통 손실의 계산

평균 손실 감도를 사용하여 모선과 관계없는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Loss(i)} = \overline{S}_{p,G,i} P_{G,i}^0 \quad (4)$$

부하 모선에 대해서도 분산된 슬랙 또는 거래 전략을 이용하여 식(3)과 유사하게 나타낼 수 있다.[1] 발전 모선의 손실 감도와 부하 모선의 손실 감도의 값을 평균 내서 평균 손실 감도를 쓰기도 한다.

2.1.4 무부하 손실에 대한 손실배분 보정

대부분의 계통에서 무부하시 송전선 충전용량에 따른 무효전력이 흐르고 있어 이에 해당하는 송전손실이 발생하고 있으며 이에 따른 손실 배분 보정도 필요하다. 무부하 계통 손실은 양이 상대적으로 매우 적으므로 발전소별 배분에서는 발전량에 비례하여 배분하도록 다음과 같이 나타내었다.

$$P_{loss(i)}^{Mod} = P_{loss(i)} + \frac{P_{G,i}^{NoLoad}}{\sum P_{G,k}} P_{loss}^{NoLoad} = \overline{S}_{p,i} P_i^0 + \alpha_{G,i} P_{loss}^{NoLoad} \quad (5)$$

여기서, P_{loss}^{NoLoad} 는 무부하시 계통 손실이다.

2.2 발전 증가 패턴을 고려한 송전 손실 배분

발전 증가 패턴을 고려한 손실 배분을 하기 위하여 발전 증가 패턴의 특징을 알아보면, 발전 증가 패턴은 발전기의 동작점(Operating Point)과 기저점(Base Point)로 나누어 생각할 수 있다. 여기서 동작점은 각각의 발전기의 최종 상태를 의미하며, 기저점은 기본적으로 유지하게 되는 발전량을 의미한다.

그러므로 발전 증가 패턴을 이용한 계통 손실 배분을 위하여 식(4)를 동작점과 기저점의 구간으로 나누어 생각한다.

1) 원점에서 기저점

$$P(\lambda_1) = \lambda_1 P^B \quad (6)$$

$$P_{loss(i)}^B = \int_0^1 S_{p,G,i}(\lambda_1) P_i^B d\lambda_1 \quad (7)$$

2) 기저점에서 동작점

$$P(\lambda_2) = P^B + \lambda_2 (P^{Op} - P^B) \quad (8)$$

$$P_{loss(i)}^{Op} = \int_0^1 S_{p,G,i}(\lambda_2) (P_i^{Op} - P_i^B) d\lambda_2 \quad (9)$$

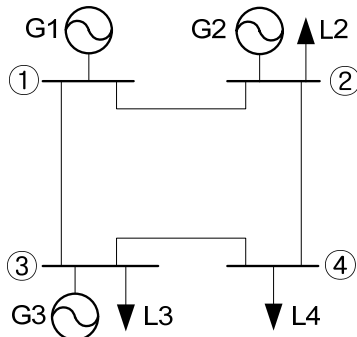
여기서 P^B , P^{Op} 는 기저점과 동작점에서의 유입되는 유효 전력 벡터이다. $P_{loss(i)}^B$, $P_{loss(i)}^{Op}$ 는 각각 기저점에서의 배분된 손실과 기저점에서 동작점까지의 배분된 손실이다.

식(6) - 식(9)을 사용하여 전체 범위내에서 배분된 손실은 다음과 같이 나타낸다.

$$P_{loss(i)} = P_{loss(i)}^{Op} + P_{loss(i)}^B \quad (10)$$

기저점을 고려하는 것은 기저의 부하와 최고치의 부하에 따른 송전 손실 배분의 결과가 다를 수 있기 때문이다. 경로 상수는 발전 증가 패턴에 따라 손실이 분배되는데 이용된다. 기저 부하의 발전기와 최고치 부하의 발전기는 발전 증가 패턴의 특별한 경우이다.

2.3 시뮬레이션 결과



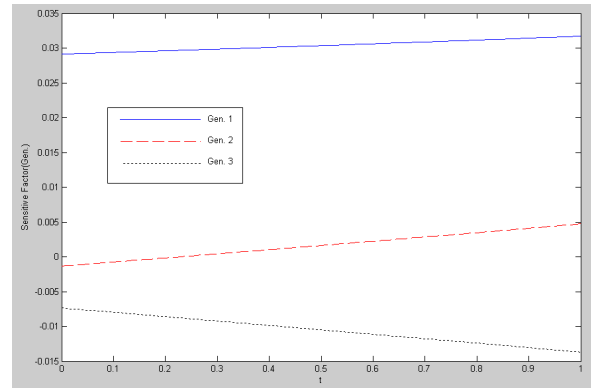
<그림 1> 4-bus 표본 시스템의 단선도

위의 <그림 1> 4-bus 표본 시스템에서 발전기 G1은 일반적인 용량이 큰 Steam 발전기로 두고, 발전기 G2는 원자력 발전기, 발전기 G3는 가스 터빈 발전기로 설정하였다. 여기서 G1은 가장 발전량이 많기 많은 발전기로 설정하였고, 슬랙 모선으로 삼았다. 또한 L4는 부하만 달린 모선으로 보고 부하량을 가장 많은 것으로 가정하였다.

<표 1> 발전 증가 패턴표

(단위: MW)

모선 번호	기저점(Base Point)		동작점(Operating Point)	
	$P_{G,i}^B$	$P_{D,i}^B$	$P_{G,i}^{Op}$	$P_{D,i}^{Op}$
1	130	-	250	-
2	200	50	200(고정)	100
3	0	100	150	200
4	-	180	-	300
총합	330	330	600	600



<그림 2> 각 발전기에서 발전 증가시 손실 감도

위에서 $\overline{S}_{p,G,1} = 0.3068$, $\overline{S}_{p,G,2} = 0.0166$, $\overline{S}_{p,G,3} = -0.1062$ 이 나온다. 또한 무부하 손실(P_{loss}^{NoLoad})은 0.089MW이다. 조류 계산을 통해 나온 손실값은 8.661MW이다. 무부하 손실은 상대적으로 값이 작다. 식(10)을 활용하여 송전 손실 배분을 구하면, $P_{loss(1)} = 5.143MW$, $P_{loss(2)} = 3.096MW$, $P_{loss(3)} = 0.333MW$ 이 나온다.

다른 여러 경우의 발전 증가 패턴을 적용한 값에 대해서도 경로에 따라 송전 손실 배분은 달라지지만, 전체 손실은 달라지지 않는다. 또한 발전 증가가 거의 되지 않는 원자력 발전소에는 적게 손실을 적용하고, 기력 발전과 같이 발전량이 급격하게 증가하는 것에는 손실 배분이 크게 적용한다.

3. 결 론

본 논문에서는 송전손실 배분에 대한 방법 중에서 발전 증가 패턴에 따른 방법을 제시하였다. 손실 감도 계산을 통하여 모선별 계통 손실을 구한다. 기저점에서 동작점으로 증가해 갈 때의 여러 경로에 대해 송전 손실 배분에 대해서 공정하게 할 수 있는 알고리즘이다. 모선별 계통 손실은 적분 경로에 따라 공정하게 적용되는지, 이에 따라 어떻게 달라지는지 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. 본 논문의 내용은 자유 경제 전력 시장에 매우 유용한데, 이를 바탕으로 송전 계통에 송전손실 배분 이론을 적용하여 전력 산업의 정책을 세울 때도 적용할 수도 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 재원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-0018076)

[참 고 문 헌]

- [1] 민경일, 하상현, 이수원, 문영현, "Transmission Loss Allocation Algorithm Using Path-Integral Based on Transaction Strategy", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.25 No.1, pp. 195-205, 2010
- [2] 민경일, 문영현, "Accurate Transmission Loss Allocation Algorithm Based on the Virtual Transmission Strategy: Comparison of Path-integral with Discrete Integral Methods", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol.5 No.4, pp. 511-521, 2010
- [3] 문영현, 홍효식, 류현수, 최병곤, 박정도 "Slack-bus independent penalty factor for regional spot pricing under deregulation", *Electric Power & Energy System*, 24, pp. 821-826, 2002