

발전비용을 고려한 연계선로 용통조류한계 계산의 알고리즘 제안

박유경\*, 한상욱\*, 서상수\*, 이병준\*, 신정훈\*\*, 김태균\*\*  
고려대학교\*, 한전 전력연구원\*\*

A algorithm of determining the maximum interface flow limit using merit order

\*YouKyung Park, \*Sangwook Han, \*Sangsoo Seo, \*Byongjun Lee, \*\*Jeong-Hoon Shin, \*\*Tae-Kyun Kim  
\*Korea University, \*\*Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

**Abstract** - In KEPCO(Korea Electric Power Corporation)system, 40% of total loads is ones of metropolitan area and large scaled generation plants are located out of metropolitan area. Therefore, to decide the maximum power transfer capability of interface line between the regions is essential for planning, control and operation of efficient transmission system. For this reason, prior study suggested calculating the limit of our interface line from the side of voltage stability. However, the presented plan had a limit partially to apply practice power system. Therefore this paper suggests a algorithm that change the generation output as the merit order instead of prior method that distribute according to proportion of present output. This method could be applied closer to practice than the existing algorithm because it consider generation cost.

1. 서 론

최근 우리사회는 산업발달의 고도화와 정보사회의 진보로 인해 전력수요가 급격히 증대하고 있다. 이에 따라 전력계통은 대도시로의 수요 집중 경향을 보이고 있다. 그리고 전원의 원격화, 편재화에 의해 송전설비의 장거리화, 대용량화가 진행되고 있다. 즉, 수도권에서 필요로 하는 유효전력은 점차 증가되고 있는 반면 대규모 발전단은 비수도권에 위치하고 있어 전압불안정을 일으키는 요인이 되고 있다. 효율적인 전력수송 수단 확보 및 기존 설비의 이용률을 향상시키기 위해서 송전용량 증대 기술과 고도의 계통운용기술에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있다.

송전 계통의 용량이 대형화되고 복잡해짐에 따라 송전용량한계 설정에 대한 연구가 지속되어 왔다. 유효전력 송전 용량은 발전 및 송전 시스템의 열적조건, 동적 및 정적 안정도에 의해 결정된다. 장기적으로 경제적이고 안정적인 전력을 공급하기 위해서는 계통의 여러 지역을 연결하거나 다른 두 계통을 연결하는 연계선로의 송전용량한계를 정확히 산정하는 것이 효율적인 송전계통의 계획 수립, 관리 및 운용에 필수적이다.

본 논문에서의 송전용량한계는 계통에서 상대적으로 발전 단가가 낮은 지역에서 높은 지역으로 유효전력을 공급할 때의 송전조류 한계를 구하는 것으로 이루어지며, 발전량 증감 시 발전기의 비용을 고려하여 발전량을 변화시키는 알고리즘을 제안한다. 기존의 비례증분에 따른 발전증가 알고리즘은 발전기의 비용 고려 없이 분담비에 의해 모든 발전기를 유효전력증가에 포함시키는 것으로 비교적 간단한 장점이 있었다. 그러나 현재 계통운영의 전략은 발전비용을 고려하여 발전기의 출력을 제어하는 것이므로 실무에 적용시키기에는 부적합하여 새로운 알고리즘 개발의 필요성이 증대되었다. 본 논문에서

제안한 발전비용을 고려한 알고리즘은 발전기의 현실적인 비용을 발전력 증가의 변수로 포함시켜, 실제적인 경제성을 획득하였고 자동적으로 발전 비용에 따라 발전량을 조절할 수 있기 때문에 기존의 방법보다 실무에서 쓰이는 운용전략에 부합하여 적합하게 활용될 수 있다.

본론에서는 제안된 알고리즘에 쓰인 연속알고리즘과 최대송전용량한계 계산에 대한 알고리즘에 대해 간단히 설명하였다. 사례연구에서는 한전계통의 2005년, 2010년 데이터를 이용하여 발전비용을 고려한 최대송전용량한계와 발전비용고려 없이 구해진 최대송전용량한계의 비교를 통해 개발 알고리즘과 기존의 알고리즘을 비교 검증하였다.

2. 연계선로 최대 송전 가능 조류계산을 위한 연속 알고리즘의 적용

2.1 연속 알고리즘

연속조류계산은 부하 증가에 따른 전력조류의 계산으로 Newton-Raphson 법의 자코비안을 그 기반으로 하여 기존 조류계산으로 찾은 기준부하에서 시작해서 계통의 정상상태 전압 안정도의 한계점까지 전력조류계산의 연속적인 해를 구하는 알고리즘이다. 예측과정과 수정과정이 계속 반복되는 연속조류계산은 다른 조류계산에 비해 임계점에서 특이성을 갖지 않아 전압 불안정점을 정확하게 찾아낼 수 있어 더욱 정확하게 전체 송전용량을 결정할 수 있다.

2.2 연계선로 최대 송전 가능 조류 계산

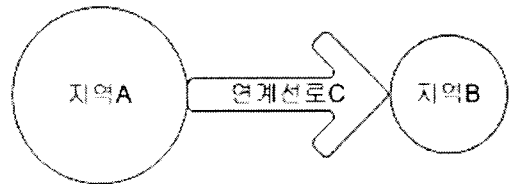


그림1. 연계선로를 가지는 계통

전압안정도를 고려한 연계선로의 송전조류한계를 구하기 위해서는 발전 파라미터  $\lambda$ 를 이용하여 발전량을 각각 조절하고 이를 통해 연계선로의 조류를 조절할 수 있도록 전력조류방정식을 재구성해야 한다[1]. 전력조류방정식을 재구성하면 발전증가 혹은 감소 시나리오에 따라서 다른 조류해를 가지게 되고 연계선로의 최대송전조류로 달라진다.

위 그림1과 같이 하나의 계통이 지역A와 지역B로 구역화 되어있고 지역B의 발전단가가 지역A의 발전단가보다 비싸다고 하면, 경제성을 고려한 계통 운전에 의하여 같은 부하에 전력을 공급함에 있어 지역A의 발전력을 가능한 이용하게 되며 이에 따라 연계선로의 유효조류는

증가하게 된다. 연계선로C가 두 지역을 연결하고 두 지역 간 조류는 지역A에서 지역B로 흐른다.

기존의 수정된 전력조류방정식은 다음과 같다

$$P_{Gi} = P_{G0} - \lambda k_{GB} P_{GB0} \quad (1.a)$$

$$P_{Gi} = P_{G0} + \lambda k_{GA} P_{GA} \quad (1.b)$$

$$\Delta P_{GB} = \sum_{i=N_{GA}+1}^{N_G} \lambda k_{GB} P_{GB}$$

- $P_{Gi}$  : i모선의 유효전력 발전
- $P_{G0}$  : i모선의 원래 유효전력 발전
- $\lambda$  : 발전파라미터
- $k_{GA}, k_{GB}$  : 지역에서의 i모선의 부담률
- $P_{GB0}$  : 지역B의 원래 총 유효전력 발전
- $P_{GB}$  : 지역B의 총 유효전력 발전량
- $P_{GA}$  : 지역A의 총 유효전력 발전량
- $N_G$  : 계통의 전체 발전기모선 수
- $N_{GA}$  : 지역A의 전체 발전기모선 수
- $\Delta P_{GB}$  : 지역B의 총 발전감소

여기서 발전비용을 고려한 유효전력의 변화를 표현하여 다음 식(2.a-3.d)과 같이 나타내었다. 즉, 지역B에서는 높은 발전단가 순으로 발전기 출력을 감소시킨다. 그리고 남은 발전감소량이 감소시켜야 하는 발전량보다 작으면 발전감소량만큼 감소시키도록 한다. 지역A에서 저렴한 발전단가 순으로 발전기 출력을 증가시킨다. 지역B에서와 마찬가지로, 한 발전기에서 증가시킬 수 있는 유효전력 발전량이 남은 발전증가량보다 크면 남은 발전증가량만큼 증가시키도록 알고리즘을 수정하였다.

지역B (유효발전량 감소)

$$\Delta P_{GB, remain} = \Delta P_{GB} \quad (2.a)$$

$$P_{Gi, remain} = P_{G0} \quad (2.b)$$

$$P_{G0} = 0 \quad (P_{Gi, remain} < \Delta P_{GB, remain}) \quad (2.c)$$

$$\Delta P_{GB, remain} = \Delta P_{GB, remain} - P_{Gi, remain} \quad (2.d)$$

$$P_{Gi} = P_{Gi} - \Delta P_{GB, remain} \quad (P_{Gi, remain} > \Delta P_{GB, remain})$$

지역A (유효발전량 증가)

$$P_{Gi, remain} = P_{Gi, max} - P_{G0} \quad (3.a)$$

$$\Delta P_{GA, remain} = \Delta P_{GA} \quad (3.b)$$

$$P_{G0} = P_{Gi, max} \quad (P_{Gi, remain} < \Delta P_{GA, remain}) \quad (3.c)$$

$$\Delta P_{GA, remain} = \Delta P_{GA, remain} - P_{Gi, remain} \quad (3.d)$$

$$P_{Gi} = P_{Gi} + \Delta P_{GA, remain} \quad (P_{Gi, remain} > \Delta P_{GA, remain})$$

- $\Delta P_{GB, remain}$  : 남은 발전감소량
- $P_{Gi, remain}$  : 가능한 발전 증가/감소량
- $\Delta P_{GA}$  : 지역A의 총 발전증가
- $\Delta P_{GA, remain}$  : 남은 발전증가량

### 3. 연계선로의 최대송전조류를 결정하기 위한 절차

#### 3.1 발전비용의 고려 없이 안전도를 고려한 연계선로의 송전조류한계를 결정하기 위한 기존의 절차

연계선로의 송전운용한계는 계통에 가장 심각한 상정 사고를 일으키더라도 계통이 정적인 전압 불안정점에 이르지 않으면서 연계선로에 흐를 수 있는 최대조류를 의미한다. 안전도를 고려한 연계선로의 송전조류한계를 결정하기 위한 절차는 다음과 같다.

1. 여러 심각한 상정사고 후보선로들을 찾고 상정 사고를 실시하여 각각에 대해 연계선로조류-전압 곡선을 그린다.

2. 가장 작은 최대송전 가능 조류를 갖는 사고를 가장 심각한 상정사고로 선택한다. 이 사고가 일어난 계통의 연계선로조류-전압 곡선에서 임계점을 가질 때의 각 발전기들의 유효전력 발전량과 발전 파라미터를 구한다.
3. 정상계통에서의 연계선로조류-전압 곡선에서 2번 과정에서 계산된 각 발전기의 유효전력량과 같은 데이터를 갖는 지점의 선로조류를 구하고 2번 과정에서 계산된 발전파라미터와 같은 값을 갖는 지점의 선로조류를 구한다.
4. 계통의 불확실성을 고려해서 이 지점의 선로조류보다 5% 낮은 지점의 선로조류를 연계선로조류의 송전운용 한계로 정한다.

#### 3.2 발전비용을 고려한 연계선로의 송전조류한계를 결정하기 위한 절차

앞 절에서 설명한 바와 같이 계통을 두 지역으로 나누었을 때, 두 지역의 부하를 고정하고 지역A에서 지역B로 전달되는 유효전력조류의 한계는 지역A의 유효전력 증가, 지역B의 유효전력 감소를 통하여 산정될 수 있다. 따라서 유효전력 증감시 지역A에서는 가장 저렴한 발전기부터 증가시키고 지역B에서는 가장 높은 가격의 발전기부터 감소시키면 기존의 방법과는 달리 발전비용을 고려한 연계선로 송전조류한계를 산정할 수 있다. 발전비용을 고려한 연계선로의 송전조류한계를 결정하는 절차는 다음과 같다.

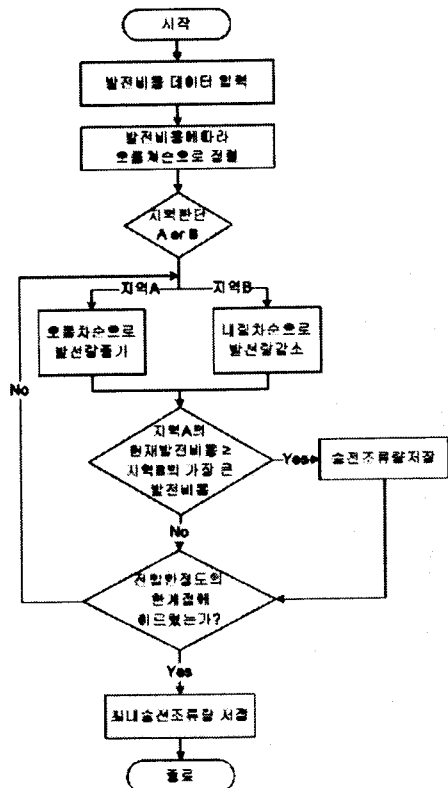


그림2. 발전비용을 고려한 조류한계 계산 절차의 순서도

### 4. 사례연구

그림2에서 감소시키려는 발전기 발전비용 값과 증가시키려는 발전기 발전비용 값을 비교하도록 되어있는데, 이는 감소시키려는 발전기 발전비용이 증가시키려는 발

전기 발전비용보다 더 낮다면 경제적 측면에서 고려대상이 될 수 없으므로 이를 판단하도록 한 것이다. 이렇게 하면, 발전비용을 고려하는 최대 용동전력 조류량이 좀 더 정확하게 구하여지게 된다.

발전비용을 고려한 최대송전조류를 찾는 사례연구를 위해 한전계통의 2005년과 2010년 데이터를 이용했다. 다음 <표1>은 발전비용을 고려하지 않은 최대송전조류와 발전비용을 고려한 최대송전조류의 비교를 보여준다. 2010년 90%의 의미는 2010년 계통계획에서 예상 부하의 90%임을 의미한다. '발전scale증가'는 발전비용고려 없이 발전기모선의 현재 발전량에 비례하여 배분하는 기존의 방식이며 '발전비용'은 발전비용을 고려하여 발전량을 증가, 감소시킨 결과이다.

발전비용을 고려한 알고리즘은 경제적인 기준에 맞게 유효전력 발전을 증가 또는 감소시키겠다는 것이므로 발전비용이 저렴한 발전기가 현재 상황에서 참여되고 있지 않다면 꺼져있던 그 발전기를 켜서 참여시킴으로서 유효전력 발전의 증가분을 담당하게 하는 것이 현재 참여하고 있는 발전기의 출력만을 증가시키는 것보다 더 효율적이라고 할 수 있다. 또한 현재 참여하고 있는 발전기의 경우에는 출력의 상한에서 가깝게 발전하고 있는 경우가 많으나 꺼져있는 발전기를 참여시켜 발전량을 증가시키면 상한만큼 발전증가분이 늘어나게 되므로 상한으로 운영해야 하는 발전기의 개수가 줄어들게 된다. 이는 전압안정도 측면에서도 바람직하다 할 수 있다. <표1>의 '사용자On'이 의미하는 것은 발전비용이 작고 용량이 큰 발전기 중에서 사용자가 원하는 발전기만을 참여시킨 것이고 '전발전기On'은 모든 발전기를 참여시키고 알고리즘을 실행한 결과이다. 기존의 알고리즘은 전체 발전기가 발전증가량을 분담하기 때문에 감소하거나 증가하는 발전기의 개수가 감소해야하는 지역 및 증가해야 하는 지역의 발전기 개수와 같지만 발전비용을 고려하게 되면 그 수는 줄어든다. <표1>에 '감소 발전기 개수' 및 '증가 발전기 개수'로 이를 표현했다.

<표1> 발전비용을 고려하지 않은 최대송전조류와 발전비용을 고려한 최대송전조류의 비교

CASE		Flow Margin [MW]	Flow Margin at Cost Limit [MW]	감소 발전기 개수	증가 발전기 개수	
2005년	발전 Scale 증가	2933				
	발전비용	3053	2385	29	38	
2010년 90%	발전 Scale 증가	현재참여	2348			
		사용자On	2801			
		전발전기 On	3755			
	발전 비용	현재참여	2473	1788	19	66
		사용자On	2926		23	40
		전발전기 On	3848		29	43
2010년 80%	발전 Scale 증가	현재참여	3605			
		사용자On	4193			
		전발전기 On	5691			
	발전 비용	현재참여	3675	1575	28	52
		사용자On	4216		28	41
		전발전기 On	발산			

발전기의 참여가 많을수록 유효전력을 발전하는 발전

기의 개수가 증가하므로 최대송전조류는 증가하게 된다. 그리고 발전비용을 고려하지 않았을 때보다 발전비용을 고려하여 발전량을 증가시켰을 때가 최대송전조류량이 더 높았다. 이는 발전비용을 고려한 경우에 있어서 증감 발전량의 분담은 해당 발전기 몇 대가 하게 되므로 계통의 구조적인 측면의 불안정 가능성이 낮아지게 되어 최대송전조류량이 증가한다고 볼 수 있다.

2010년 90%의 결과를 보면 현재 꺼져있는 발전기를 참여시킨 경우, 최대송전조류량이 늘어나기 때문에 현재 참여하는 발전기만 고려했을 때보다 증가하는 발전기의 개수가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 반면에 감소하는 발전기의 개수는 새로 참여하게 된 발전기들의 발전 증가량이 기존의 발전기의 증가량보다 크기 때문에 줄어드는 양상을 보인다.

2010년 80%의 결과에서는 사용자가 원하는 발전기를 참여시켜도 감소하는 발전기의 맨 마지막 발전기의 용량이 증가된 최대송전조류량을 모두 담당할 수 있으므로 감소 발전기의 개수가 증가하지 않는다. 그러나 증가 발전기 개수는 감소하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 연계선로를 통해 계통의 두 지역사이에서 전력이 융통되고 있을 때, 정적인 전압안정도 측면에서 발전비용을 고려한 연계선로의 최대 송전 조류를 산정하는 방법을 제시했다. 기존의 제안된 방안에서의 발전 증감분은 전체 발전량에 대한 현재 발전량의 비율 산정하여 분담하도록 되어 있었다. 이는 현재 계통운용측면에서 발전비용을 고려하여 운용하는 현실과 맞지 않았다. 따라서 이전에 제시된 방안에서 알고리즘 수정을 통하여 체계적이고 자동적으로 발전비용을 고려하는 알고리즘을 제안한 것이다. 사례연구에서는 한전 계통을 사용하여 기존의 알고리즘과 본 논문에서 제안한 방안을 비교 검토하였다. 그 결과 제안된 알고리즘을 이용한 경우의 융통조류 여유가 기존의 방안보다 더 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이는 발전 배분을 할 때 전체 발전기들이 비례배분을 하여 분담 발전할 경우, 계통 선로에서 병목현상으로 인하여 계통의 구조적 문제가 발생하였다고 할 수 있다. 반면 제안된 방안은 증감 발전량이 발전비용 순으로 순차적으로 증가, 감소되기 때문에 계통의 구조적 특성에 의한 제한이 적게 발생하여 융통조류 여유가 증가되었다고 할 수 있다. 이러한 결과는 현재 운용중인 발전비용을 고려한 발전력 조정 방안들이 계통 구조적 측면에서 보다 나은 방안을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 알고리즘을 이용하여 발전비용을 고려하게 된다면 현재 운용자적 측면에서 실시하는 많은 반복 작업들의 어려움이 해결될 수 있다.

발전비용을 고려한 융통선로 조류 한계를 선정하는 방안은 현실적으로 매우 중요하며 필요한 방안으로 본 논문에서 제안된 방안으로 어느 정도 해결되었다고 할 수 있다. 그러나 앞으로, 제안된 알고리즘을 보다 현실적인 문제가 고려될 수 있도록 하는 계속적인 수정과 보완이 필요하다. 그리고 상용 프로그램과의 비교검증을 통하여 제안된 방안의 신뢰성 확보가 요구된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Byongjun Lee, Hwachang Song, Sac-Hyuk Kwon, Gilsoo Jang, Jun-Ilwan Kim, and Venkataramana Ajarapu, "A Study on Determination of Interface Flow Limits in the KEPCO System Using Modified Continuation Power Flow(MCPF)", IEEE Transactions on Power System, Vol.17, No.3, pp557-564, August 2002