

정확한 전압붕괴점 결정에 의한 무효전력 보상 효과 선정 방법에 관한 연구

김정훈, 함정필, *이병하, **원종률
 홍익대학교 전기제어공학과, *인천대학교 전기공학과, **한국전력공사

A study on the Reactive Power Compensation Effect Calculation by Determining an Accurate Voltage Collapse Point

Jung-Hoon Kim, Jung-Pil Ham, *Byung-Ha Lee, **Jong-Ryul Won
 Hong-ik University, *In-Chon University, **KEPRI

Abstract - Many developing countries has been voltage unstable and the inter- change capability in Korea is limited by voltage instability. In analyzing voltage stability, load model has been considered as constant power, but actual loads vary as voltage changes. In order to incorporating voltage-dependent load model, we need the low-side of P-V curve that can not be obtained by general load flow algorithm.

This paper proposes a modified GCF algorithm to obtain a full low-side of P-V curve and a accurate voltage assessment index considering load model. 5-bus sample system and 19-bus real power system are applied to simulate the proposed GCF. Also, the effect of reactive power compensation is illustrated in same systems.

1. 서 론

부하의 급증에 따라 전력 계통이 점차 대규모화되면서, 계통 전압의 불안정 현상이 나타나게 되어 미국, 일본, 프랑스등의 선진국에서는 이미 전압 붕괴 현상을 겪은 바 있다. 또한 구조 개편이 이루어지면서 지역간 융통 전력의 최대값 산정에 관심이 모아지고 있는데, 이는 열계약, 전압 제약 및 안전도 제약중의 최소값으로 결정된다. 현재 선진화된 계통에서는 전압 안정도 제약에 의하여 최대 융통전력이 결정되고 있으며, 우리나라에서도 실계통의 지역간 융통 조류 산정에서 전압 안정도에 의한 제약이 가장 먼저 나타나고 있다.[1-2]

한편, 부하 모델은 과거에는 정전력 모델이나 ZIP 모델로 표현되어 왔으나, 부하의 다양화 추세에 의하여 1979년 UTA에 의해 본격적인 연구가 시작되었고 우리나라에서도 본 연구진에 의해 1990년과 2000년에 5차식의 다항식 모델이 제시된 바 있다.[3]

전압안정도 해석상 부하는 대부분 정전력 모델로 취급되어 왔으며, 이때의 전압 붕괴점은 최대 전력 전송점과 같다. 그러나, 지난번의 연구에서 전압 붕괴점과 최대 전력 전송점은 불일치함을 보였으며, 부하모델을 고려한 선형화된 전압안정성 지수를 제안하였다.[4-5] 이 지수는 30모선 계통을 대상으로 하여 연속 조류 계산법에 의해 수행되었으며, 그 결과 일부 모선에서 정확한 P-V 곡선의 하반부를 그려내지 못하여 부하모델을 고려하는데 있어 제한적인 특성을 보였으며, 지난 연구에서 제안된 지수는 계통 규모가 커지면서 그 선형성 또한 많이 파괴되는 문제점이 있었다.

하반부 특성의 추정을 위한 방법으로 연속 조류 계산법 이외에 G.C.F. (Generalized Curve Fit) 알고리즘이 있으나, 이는 전반적인 곡선 추정에 실패하는 경우가 있다. 이에 본 연구에서는 이를 보완하는 새로운 GCF 알고리즘을 제안하였으며, 부하모델을 고려하면서 실계통

에서도 그 선형성을 보존할 수 있도록 기존의 지수를 보완하였다. 이렇게 보완되어진 지수는 정확한 전압 붕괴점을 결정할 수 있다. 그 결과가 5모선 계통과 19모선의 실계통에 적용되어 그 성능을 검증하였으며, 부하모선별로 무효전력을 보상하여 19모선의 실계통에서 그 결과를 보였다.

2. 새로운 GCF

2.1 연속조류 계산법과 GCF

연속조류계산법(CPF: Continuation Power Flow)은 전력 조류 계산의 재구성을 통하여 최대전력전송점에서 Jacobian의 행렬식이 0이 되지 않도록 제한된 강인한 알고리즘이다. 이는 정확한 최대전력전송점을 찾아낼 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 하반부에 이르러서는 잘못된 곡선을 추정하는 경우가 있으며, 부하모델을 반영할 경우 그림과 같은 오류가 나타나는 이유[6]로 하반부 특성이 중요한 부하 모델에는 적합치 못하다는 단점을 가지고 있다.

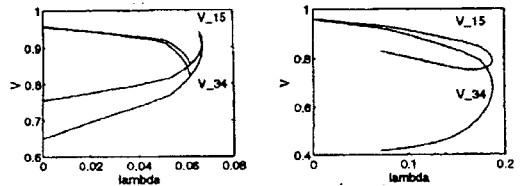


그림 2.1. 부하를 고려한 CPF의 잘못된 곡선 추정

이에 비해, 일반적인 GCF 알고리즘은 세 개의 조류해를 이용한 곡선 추정 방식이다. 간단하면서도 정확한 P-V 곡선의 특성을 잘 나타내 주는 장점이 있으나, 그림과 같은 큰 오류를 범하는 단점을 가지고 있다.[7]

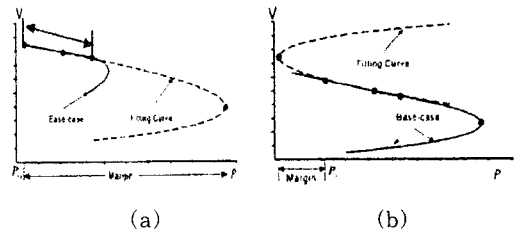


그림 2.2. GCF 알고리즘의 잘못된 곡선 추정

2.2 새로운 GCF 알고리즘의 제안

위에서 보여진 그림과 같은 GCF 알고리즘의 오류는 다음과 같은 사항에 기인한다.

- ① 추정에 사용되어질 3개의 조류해가 최대 전력 전송점과 너무 멀리 떨어져 있는 경우 (그림 2.2 (a))
- ② 세 개의 조류해 중 두 번째 해의 전압값이 낮은

경우 (그림 2.2 (b))

이 이외에, P와 V의 값이 큰 차이를 보일 경우는 곡선은 추정되나 그 기울기 등의 P-V곡선에 대한 정보가 정확하지 않다는 사항 역시 문제가 된다. 위와 같은 GCF의 문제점들을 수정하기 위하여 본 논문에서는 GCF 알고리즘에 다음과 같은 사항을 적용, 보완하였다.

- ① 반복조류 계산을 이용하여 조류계산이 발산하기 전까지의 조류해를 구한다.
- ② 기준 사례 다음 단계의 조류해를 첫 번째 점으로 선정한다.
- ③ 전압붕괴점까지의 반복회수 N을 이용하여 두 번째 점은 $0.9 \times N$ 이 되는 점을 두 번째 점으로, $N-1$ 번째의 조류해를 세 번째 점으로 선택한다.
- ④ 선택된 점의 저전압 여부를 검증한다.
- ⑤ 만일 저전압일 경우, 한 단계 앞의 조류해를 선택하여 ④로 가고, 그렇지 않을 경우 다음 단계로 간다.
- ⑥ 선택되어진 세 점을 P.U 값으로 환산하여 GCF 알고리즘을 적용한다.

3. 전압 안정도 지수의 보완 및 무효전력 보상에 의한 전압안정도의 개선 효과

3.1. 전압 안정도 지수의 보완

지난 연구에서 제안된 지수를 사례 연구에 적용해 본 결과 지수 함수의 특성에 따른 변화가 심하여 전압 붕괴점 부근에 이르러 그 선행성을 유지하지 못하는 것을 볼 수 있었으며 다모션 계통에서의 지수의 적용에 대한 연구가 미흡하였다. 따라서, 이번 논문에서는 제안되었던 지수를 다음과 같이 보완하였다.

$$NI_i = \left[1 - \sqrt{\exp\left(\left(\frac{dP_i}{dV_i}\right)^{nose} - \left(\frac{dP_i}{dV_i}\right)^{load}\right) / K_0} \right] / NI_i^{MAX}$$

여기서, K_0 는 지수함수의 비선형적 특성을 감소시키기 위해 도입된 상수이며, NI_i^{MAX} 는 지수의 최대값으로써 지수를 정규화하는 역할을 하므로, 모든 모션에서의 전압 안정도의 여유를 한눈에 파악할 수 있다.

3.2. 무효전력 보상에 의한 전압안정도의 개선 효과

무효 전력과 전압은 밀접한 관계에 있으며, 무효 전력의 보상은 계통의 안정도 향상에 큰 영향을 미친다. 이 효과를 보다 정량적으로 평가하기 위하여 다음과 같은 단계를 거쳐 시뮬레이션을 수행하였다.

- ① 기준 사례의 조류 계산에서 부하 모션의 역률을 계산하여 이 역률로 반복조류계산을 수행한다.
- ② 역률을 증가시켜 반복조류 계산을 재수행한다.
- ③ 역률별 반복계산의 결과를 수정된 GCF에 적용하여 보상 용량별 P-V곡선을 추정한다.
- ④ 이렇게 구해진 각각의 P-V 곡선에 부하를 반영하여 지수를 산출하고, 이 지수에 의해 기준 사례에서의 전압 붕괴점을 구한다.
- ⑤ 전압 붕괴점이 ③에서 구한 P-V곡선에서 안정한 운전점으로 이동하게 된다. 이 변화한 운전점을 계산하고, 지수를 이용하여 증가한 전압안정도의 여유를 계산한다.

4. 흐름도

본 위의 과정을 도식화한 흐름도는 다음과 같다.

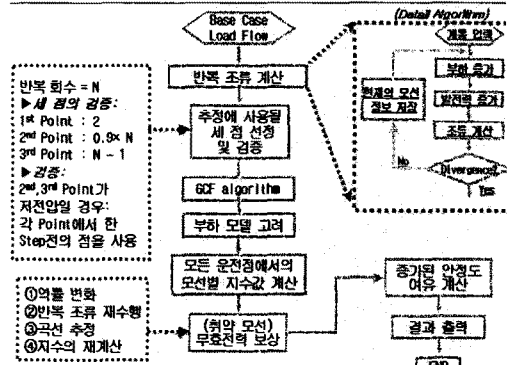


그림 4.1. Flow Chart

5. 사례 연구

5.1 사례 연구 계통

제안된 알고리즘을 적용할 계통으로 간단한 2기 계통과 19모션 계통을 선정하였다. 그 각각의 계통은 다음과 같다. 표 5.1은 계통의 정보를 간단히 요약한 것이다.

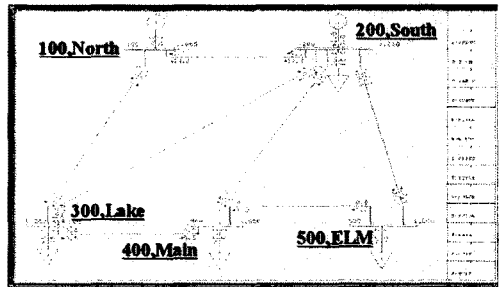


그림 5.1. 2기 5모션 계통도

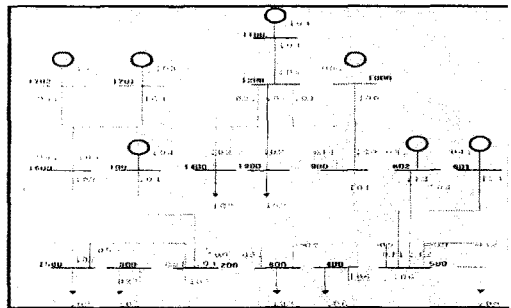


그림 5.2. 19모션 계통도

표 5.1. 계통 정보

	발전 모션수	부하 모션수	계통 MVA	총 발전량		총 부하	
				P	Q	P	Q
5모션 계통	2	3	100.0	169.6	38.34	165.0	40.0
19모션 계통	7	12	3.0	2.57	0.38	2.52	0.83

5.2. GCF 알고리즘

기존의 GCF 알고리즘과 본 연구에서 보완된 알고리즘을 비교하기 위하여, 2기5모션과 19모션 계통을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 현재 전력 공사에서 실제 계통 해석에 사용되는 PSS/E의 퍼

지인 IPLAN가 사용되었으며, Celeron 533MHz, RAM 256 MB의 환경에서 수행되었다.

그 결과 2기5모선에의 두 알고리즘은 차이가 없으나, 19모선의 700번 모선과 300,800번 모선에서 기존의 GCF 알고리즘이 곡선 추정에 실패하였으며, 제안된 GCF는 실제의 P-V 곡선에 부합된 모습을 보여주었다. 대표적인 700번 모선의 결과만을 수록하였으며, 참고로 400번 모선과 500번 모선에서 기존의 GCF는 그림 2.2의(a)와 같은 형태의 오류를 나타냈다.

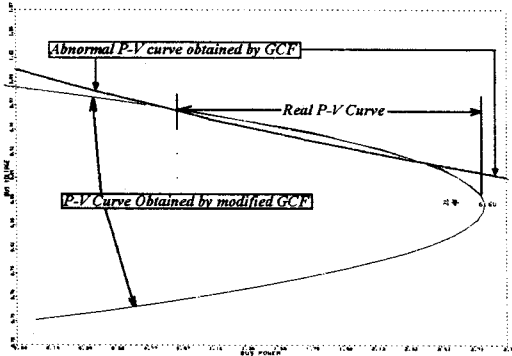


그림 5.3. 19모선, 700번 모선에서의 추정 결과

5.3. 보완된 지수

새로 보완되어진 지수는 두 적용 계통의 모든 부하 모선에서 거의 직선의 형태를 보여주어 그 성능을 확인할 수 있었다. 이는 부하모델이 고려되어진 지수이며, 그 선형성에 의하여 전압붕괴점까지의 여유를 쉽게 추정할 수 있다. 대표성이 있는 2기5모선 계통의 400번 모선과 19모선 계통의 400번 모선만을 그림 5.5, 그림 5.6에 수록되었다. 부하의 구성비는 실제통에 가깝도록 정전력, 정전류, 정어드미턴스의 비를 각각 0.6, 0.1, 0.3으로 가정하였다.

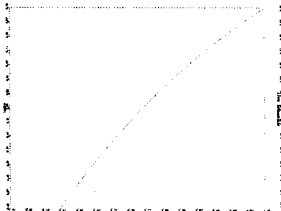


그림 5.4
제안된 지수의 그래프
(5모선, 400번 모선)

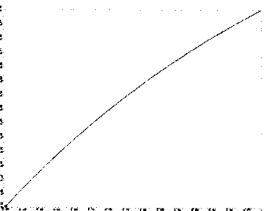


그림 5.5
제안된 지수의 그래프
(19모선, 400번 모선)

5.4 무효전력 보상에 의한 전압안정도의 개선 효과

무효전력의 변화가 전압 안정도에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 19모선 계통에서 무효전력을 일정 비율로 보상하여 곡선과 그에 따른 운전점의 변화를 살펴보았다. 그 결과 곡선에서의 운전점 변화는 아래와 같았다.

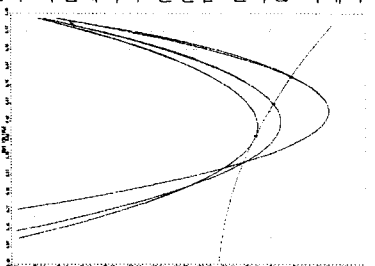


그림 5.6 무효전력 보상에 의한 P-V 곡선과 운전점의 변화(400번 모선)

그림 5.7에서 나타난 바와 같이, 무효전력을 보상함에 따른 운전점의 전압은 0.54, 0.673, 0.786(P.U)로 점차 전압붕괴점으로부터 멀어지는 것을 볼 수 있다. 이 운전점의 변화에 따른 전압안정도의 여유를 정량적으로 평가하기 위하여, 이를 제안된 지수에서 살펴본 결과가 그림 5.8이다.

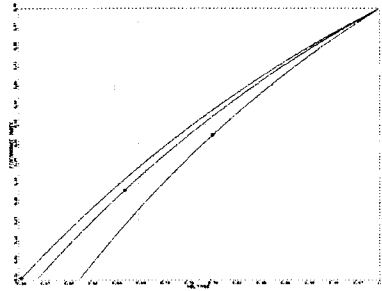


그림 5.7 무효전력 보상에 의한 지수와 운전점의 변화

세 개의 지수 그래프에서 보여지는 상태의 변화로써 무효전력 변화에 의한 전압 안정도의 여유가 정량적으로 평가될 수 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 다모선 계통에서 부하 모델을 고려한 정확한 전압 붕괴점의 계산과 이를 선형성을 유지할 수 있는 지수의 제안에 그 초점을 두고 있다. 이를 위하여 P-V 곡선의 하반부 특성까지 얻어낼 수 있는 GCF 알고리즘을 적용하였으며, 그 단점을 보완할 수 있는 보완된 GCF를 제안, 이를 현재 한전에서 계통 해석에 사용하고 있는 PSS/E에서 시뮬레이션을 수행하여 그 효용성을 검증하였다. 아울러, 무효전력 보상에 의한 계통의 전압 안정도 여유의 증가를 확인할 수 있었다.

추후 본 논문에서 확인된 무효전력 보상과 계통의 전압안정도 증가의 관계를 정량화하고, 이를 이용한 무효전력의 운용방법론에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Scott Wunderlich, Tong Wu, and Robert Fischl, "An Inter-Area Transmission and Voltage Limitation (TVLIM) Program", IEEE Trans. on Power System, Vol.10, No.3, Aug. 1995
- [2] 한국 전력 공사, 계통 운용상의 적정 송전능력 산정에 관한 연구, 2000.
- [3] 한국 전력 공사, 전력계통 안정도 해석을 위한 적정 부하 모델에 관한 연구, 1990, 2001.
- [4] 위원석, 추진부, 김정훈, "부하모델을 고려한 전압안정도 평가지표 개발과 시스템 안정도 연구", 대한 전기학회 1999년 추계 학술대회 논문지, 1999년
- [5] W.S. Wee, Jung-Pil Ham, J.H. Kim, "A Study on Developing Voltage Stability and Reactive Power Compensation by Incorporating Load Modeling", IC2K, 2000
- [6] Hsiao-Dong Chiang, Alexander J.Flueck, "CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.2, May 1995, pp.623-631
- [7] JiHong jia, B. jeyasurya, "Contingency Ranking for On-Line Voltage Stability Assessment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No.3, Aug., 2000, 1093-1097