

전력계통해석을 위한 Non-Divergent 조류계산의 실용적 적용

국경수, 이정호, 문영환, 김호용, 오탈규
한국전기연구원

Practical application of NDPF solution in power system analysis

Kook Kyung Soo, Lee J.H., Moon Young-Hwan, Kim Ho Yong, Oh Tae kyoo,
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describes the practical application of Non-Divergent Power Flow (NDPF) solution in power system analysis. NDPF algorithm prevents the power flow solution from diverging due to the arithmetic error in Newton method, and indicates voltage collapse point. In addition to that, NDPF solution provides us with useful information for evaluating voltage profile in such cases.

전력수급 조건을 만족하는 전력계통 각 모선의 전압과 위상각을 계산하는 과정이며 이를 위해 주어진 부하모선의 유효전력 및 무효전력, 그리고 발전모선의 유효전력 및 모션전압으로부터 각 모선의 위상각과 부하모선의 전압을 계산한다. 이러한 조류계산은 비선형 문제이며 다양한 반복계산기법으로 해를 구하게 되는데, 이 중 수렴 특성이 우수한 Newton-Raphson 법이 널리 적용되어 오고 있다. 이와 같이 조류계산의 해를 구할 경우, 그 계산결과는 다음 중 하나에 해당된다.[2]

1. 서 론

표 1. 조류계산 결과의 분류

조류계산은 전력계통의 정상상태를 해석하는데 매우 유용한 방법이다. 즉, 주어진 전력수급 조건을 만족하는 전력계통 각 모선의 전압과 위상각을 계산함으로써 임의의 조건에서 전력계통의 정상상태 응답을 산정해 볼 수 있다[1]. 상정고장해석이나 지역간 송전용량의 평가, 전압안정도 평가 등은 조류계산을 적용하는 대표적인 계통 평가 방법이다.

계산결과	상태
수렴 (Convergence)	모든 모선, 또는 전력망에 대해 수렴오차 한계가 만족됨
비수렴 (Non-convergence)	수렴오차 한계가 만족되지 않았으나, 해가 발산하지는 않음
발산 (Divergence)	반복 계산시 수렴오차가 크게 증가됨.

또한, 방대한 사례분석이 요구되는 대규모 전력계통 해석의 경우, 전력계통의 취약점과 취약조건을 평가/선택하고 정의해야 하는 개괄적 해석단계에서는 전압안정도 측면의 안정여유 등과 같은 구체적인 지수보다 조류계산을 통한 실용적 평가가 요구될 경우가 많다. 즉, 상정고장 적용 후 계통운영조건 만족여부 평가나 지역간 송전용량을 제약하는 취약개소의 도출, 또는 전압안정도 측면의 계통취약 개소를 찾는 등 계통의 취약조건과 취약개소를 도출하고, 이를 개선하기 위한 방안을 적용하여 그 적용효과를 검토하게 되는 경우 대부분 조류계산이 적용된다.

이 중 조류계산해가 발산한 경우, 그 계산결과는 실제의 계통상태와 관계없는 값을 가지게 되어 전력망의 어느 위치에서 심각한 전압 또는 무효전력의 문제가 발생되었는지 등에 대한 정보를 얻을 수 없다. 이러한 발산의 경우는 뉴턴 계산방법에서 자코비안이 singular 상태로 될 때 전형적으로 나타나는데, 이는 곧 전압불안정 상태를 의미한다. NDPF는 이러한 조류계산 해의 발산을 방지하여 전압불안정 상태에서의 계통상태에 관한 정보를 제공할 수 있다. 다음 그림 1은 조류계산 해가 발산하게 되는 전형적인 예를 보인다.

반면, 가장 우수한 수렴특성을 가지는 Newton법에 의해 비선형의 조류계산의 문제를 풀게 되는 경우, 반복계산법의 계산상 오차나, 전압 불안정 상태에 의한 자코비안 행렬의 Singularity 특성으로 인해 조류계산해가 발산할 수 있는데, 계통의 성능평가나 취약개소의 도출 등은 대부분 이러한 임계조건에서 이루어지기 때문에 상당한 주의가 필요하다. 즉, 조류계산 해가 발산한 경우 그 계산결과는 실제의 계통상태와 관계없는 값을 가지게 되어 계통에 관한 정보를 얻을 수 없기 때문이다.[2,3]

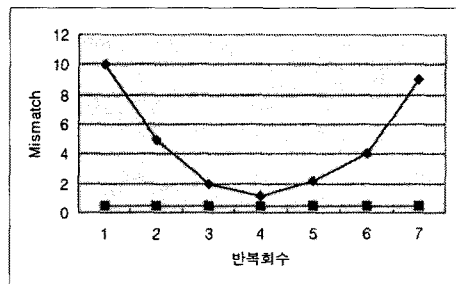


그림 1 조류계산의 발산 예

이에 대해 본 논문에서는 전력계통해석을 위한 Non-Divergent 조류계산의 실용적 적용을 검토한다. Non-Divergent 조류계산은 Newton법 계산의 수렴상태에 따라 조류계산 변수의 충분 값을 적절히 조절함으로써 조류계산의 발산을 방지하고, 전압 불안정 상태에서의 조류계산시에도 적절한 계산 결과를 제공할 수 있다. 이를 통해 전압붕괴점 근처에서의 계통상태, 또는 가혹한 상정고장 발생시의 계통상태를 분석할 수 있다.

2. Non-Divergent 조류계산

2.1 조류계산의 특징

전력계통의 정상상태를 평가하는 조류계산은 주어진

2.2 Non-Divergent Power Flow

NDPF의 계산과정은 다음 그림 2와 같다.

즉, 조류계산해의 각 반복단계에서 모선의 전력량을 사용하여 전압정정배터리를 예측한 후 다음 식에 따라 전압을 갱신한다.[2,3]

$$V_{new} = V_{old} + \mu \Delta V \quad (1)$$

단, V_{old} : 전압 정정 이전의 전압
 V_{new} : 전압 정정 이후의 전압
 $0 < \mu < 1$

이때, μ 의 값은 1.0을 초기값으로 하여, 전압정정 후에 계산이 발산의 경향을 보이는 경우, 즉 모선 전력 편차 제공의 합이 증가되는 경우, μ 값을 줄여 전압을 다시 정정하며 이러한 과정을 이에 따른 모선 전력 편차 제공의 합이 감소하거나 μ 의 값이 0에 가까운 값이 될 때까지 반복한다. 이때 전압정정의 재 계산에 의해 계산의 수렴성이 향상된 경우에는 자코비안에 의한 반복 계산을 계속 진행한다. 반면, μ 값이 0에 가까운 값까지 감소된 경우에는 계산의 해가 더 이상 개선될 수 없음을 나타내어 조류계산을 중지하게 되는데, 이는 곧 자코비안 행렬이 singular함을 나타내게 되며, 전압붕괴로 선언될 수 있다. 하지만 이러한 NDPF 해는, 비록 전체 계산이 수렴하지는 못했으나 각 모선에 대해 수렴한계를 만족하거나 수렴한계를 초과한 계산결과를 제공할 수 있으므로, 조류계산해를 정확히 계산하지는 못하더라도, 대부분의 전력계통 신뢰도에 적용되는 합리적인 유효전력 마진 이내의 오차를 가지는 조류계산해를 계산할 수 있다. 따라서 이를 통해 전압불안정 상태에서의 전압분포 및 무효전력의 수급상황 등을 실용적으로 평가 할 수 있다.

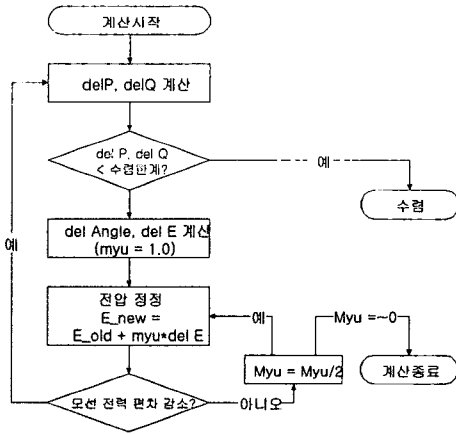


그림 2. NDPF의 계산절차

그림 3은 NDPF에 의해 조류계산이 수렴되는 예를 보인다.

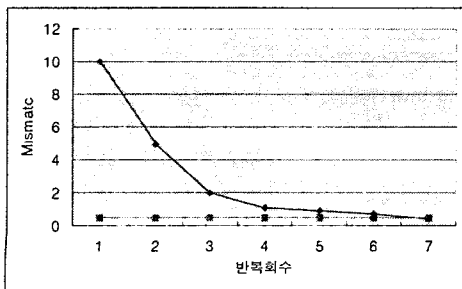


그림 3. NDPF에 의한 조류계산의 수렴

그림 4는 NDPF에서 μ 의 값이 0에 가까운 값이 되는 경우를 보인다.

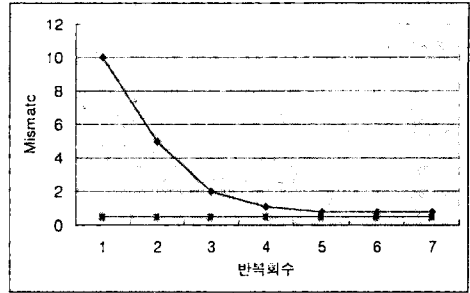


그림 4. NDPF에 의한 조류계산의 발산방지

3. 계통해석의 적용 사례

3.1 전압불안정 상태의 해석

전압불안정 상태를 가정하기 위해 다음과 같은 P-V 곡선으로 전압붕괴점 근처의 계통운영점을 찾는다. 다음 그림 5는 지역간 송전전력의 증가에 따라 감시대상 모선의 전압변동을 나타내고, 최대 송전용량 증분이 870 [MW]로 산정되었으며, 수전지역에 있는 107, 108, 109 모선의 전압이 급격히 하강했음을 알 수 있다.

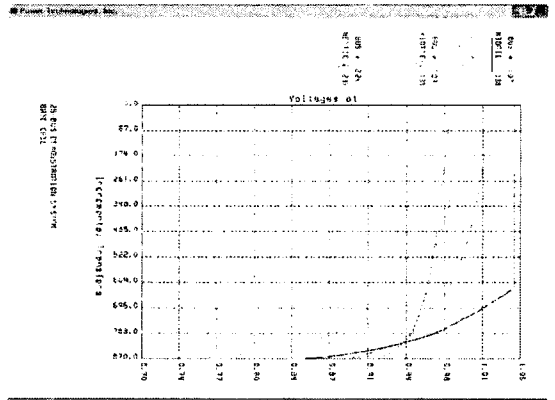


그림 5. 지역간 송전전력 증가에 따른 P-V 곡선

다음 그림 6은 NDPF를 적용하여 지역간 송전용량이 최대점을 초과한 경우까지의 모선전압 분포를 보인다. 즉, NDPF를 적용하여 전압불안정 상태에서의 전압분포를 찾을 수 있으며 이를 통해 전압붕괴 상태를 실용적으로 확인 할 수 있음을 알 수 있다.

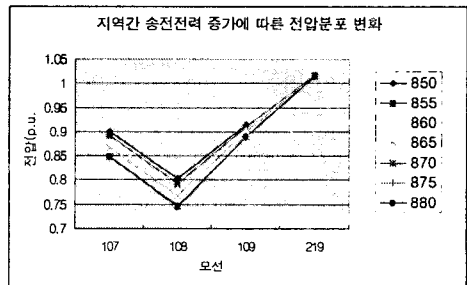


그림 6. NDPF를 이용한 전압분포 분석

3.2 상정고장 해석

다음 그림 7은 상정고장 해석을 위한 시험계통이며 건전상태에서의 조류계산해를 나타낸다.

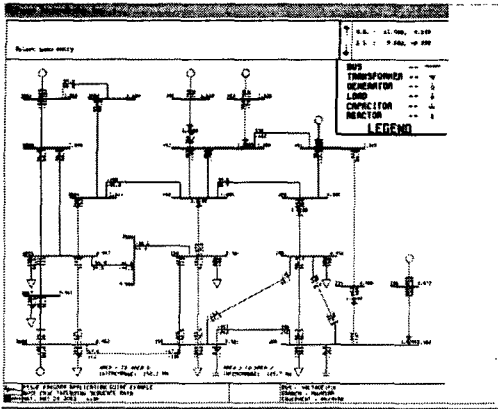


그림 7. 시험 계통

시험계통에 대해 가혹한 상정고장 조건 중의 하나인 "151-152 모선간 선로 2회선 탈락"을 적용한 후 조류계산 해를 구했다.

다음 그림 8은 이러한 조건에서 기존의 조류계산 해와 NDFP 해에서 얻어진 모선 전압을 건전상태의 값과 비교하여 나타낸다.

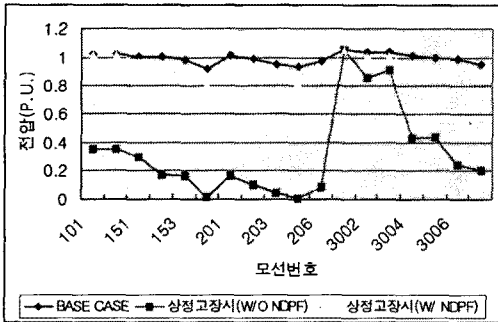


그림 8. 조류계산 결과에 따른 전압분포

그림 8에서 기존 조류계산의 해는 발산하여 모선전압이 과도하게 낮은 값으로 나타나는 반면, NDFP의 해는 합리적인 계산결과를 제공하여 탈락 선로의 전력조류가 선회하는 루트 상에 있는 154, 204, 205 모선의 전압이 취약개소임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력계통 해석을 위한 Non-Divergent 조류계산의 실용적 적용을 검토하였다. 발산한 조류계산 해로부터는 계통상태에 관한 유용한 정보를 얻을 수 없는데 반하여 Non-Divergent 조류계산은 조류계산 해의 발산을 방지하여 이를 통해 얻은 조류계산 해에서는 전압불안정 상태에 대한 계통정보를 실용적으로 얻을 수 있고, 전압붕괴점 또한 확인할 수 있다. 따라서 전력계통의 취약점 도출과 상정고장의 가혹도 평가 등 방대한 사례연구가 요구되는 대규모 전력계통의 개괄적 해석단계에서 Non-Divergent 조류계산을 실용적으로 적용할 수 있다. 본 논문에서는 이를 위해

Non-Divergent 조류계산의 특성을 분석하고, 전형적인계통해석에 대한 적용결과를 통해 그 실용성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] "전력계통의 해석 및 운용", 동일출판사, 송길영, 1995.
- [2] "KERI 10-Week Training Program", PTI, 2003.
- [3] X.Y.Chao, R.R.Austria, N.D.Reppen, D.E.Welch, "Practical Determination of Operating Transfer Limits", IEEE Conference, 1995.
- [4] Ricardo Austria, Xiaokang Xu, Michael Power, "Voltage Stability Study of a Practical Power System", 13th Conference of the Electricity Power Supply Industry, Manila, Philippines, October 2000.
- [5] T.J. Overbye, "A Power Flow Measure for Unsolved Cases", IEEE Transactions on Power System, Vol.9, NO.3, August, 1994.
- [6] Y.Tamura, K.Iba, and S.Iwamoto, "Relationship between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solution in Electric Power Systems", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-102, May 1983.