

배전계통에 적용된 조류계산 알고리즘 적용사례 및 미래형 연구

이상성 \*송광재 \*손진만 \*한종교 \*이태용 \*박종근 \*문승일 \*\*\*김재철 \*\*\*\*이승근  
\*기초전력공학공동연구소 \*서울대 \*\*숭실대 \*\*\*전주대

Current Case & Future Study applied on Distribution System Load Flow Algorithm

S. S. Lee \* J. M. Sohn \* K. J. Song \* J. G. Han \*\* T. Y. Lee \* J. K. Park \*\* S. I. Moon \*\*\* J. C. Kim \*\*\*\* S. K. Lee  
\*EESRI \*\*Seoul National University \*\*\*Soongsil University \*\*\*\*Jeonju University

**Abstract** - 본 연구에서는 현재 국내-외 논문을 참조하여 배전계통에 적용된 조류계산 알고리즘의 적용사례를 조사하였다. 배전계통에 적용된 조류계산 알고리즘은 Power Summation Method와 Current Summation Method가 있다. 배전계통은 선로의 구조가 거의 대부분 방사상으로 구성되어 있기 때문에 Newton Raphson, Gauss Seidel, Fast Decoupled 방법을 그대로 사용하는 문제가 있다. 그래서 DistFlow, Forward/Backward sweeping 법 등이 주로 사용되어 왔다. 그러나 미래의 계통은 현재와는 또 다른 Topology로 방사상과 루프가 혼합된 형태로 다르게 구성되어야 할 것이다. 이러한 상황에서 미래의 배전계통에 대하여 적용 가능한 알고리즘을 전망하고자 한다.

1. 서 론

뉴턴 랩선과 고속 분할(Fast Decoupled) 조류계산(FDLF) 해법과 이의 파생기법은 30년 이상 전력계통 특히 대형 송전계통에서 잘 적용되어 왔다[1,2]. 그러나 배전계통은 다음과 같은 측면에서 송전계통과는 약간 다르다고 할 수 있다.

- (a) 배전계통은 전형적으로 방사상(radial)이거나 또는 일부분이 그물망으로 되어 있다.
- (b) 보통, 배전 선로는 R/X비가 크다.
- (c) 배전계통은 불평형 부하와 단상 또는 2상 선로를 포함한 심한 3상 불평형일 수도 있다.

그러나, 송전계통에 적용된 조류계산 알고리즘을 그대로 분로의 R/X비가 큰 방사상 배전망에 적용한다는 것은 적절하지 않다고 할 수 있다. 이런 기존 송전계통 알고리즘의 대안으로 새로운 배전망에 대해 적합한 또 다른 조류알고리즘을 개발을 필요로 하였다. 이런 방사상 배전 조류계산(DISTFLOW)을 위한 가장 흔하게 사용되는 기법은 다음과 같이 2가지가 있다.

- 첫 번째로 피이드(feeder)나 분지(laterals)의 말단에서 자코비안의 형성이나 전력 편차의 계산을 포함하는 뉴턴과 같은 기법에 바탕을 둔 것이다.
- 두 번째로 분지 전류(branch current) 흐름의 계산을 포함한 후진과 전진 스위프(backward and forward sweeps)에 기준을 둔 것이다[3,4,5].

최근, 마이크로 터빈, 연료전지, 에너지 저장장치의 도입으로 인하여 분산 전원을 설치할 수 있는 여지가 많아졌다고 할 수 있다. 이로 인하여 기존의 배전계통은 동태 해석을 덧붙인 새로운 연구가 필요하게 되었다. 회로망 영향을 고려한 동태 시뮬레이션을 위하여, 조류계산은 적당한 시간 간격으로 수행되어야 한다. 계통 운용 조건은 동적 사고시 다양하게 변화하게 되었다. 동시에, 이는 조류 알고리즘이 정적 연구보다 더욱 강인(robust)하여야 하고 빠르게 실행되어야 한다.

이전의 배전 조류 알고리즘은 근원적으로 계획을 위한 정적 조류계산 해석을 하는 것이었다. 이 방법이 동

적 시뮬레이션에 사용될 경우에, 이는 빠르지도 않고 강인하지도 않은 경향이 있었다. 이런 문제점을 개선하기 위하여, 배전계통의 느린 다이내믹스의 시뮬레이션을 위하여 적당한 조류알고리즘을 개발하기 위하여 보상 전력 조류방법이 먼저 제시되며, 약간의 그물망 계통의 해를 구하는데 사용되었다. 이는 분산 전원 계통을 PV 노드(node) 보상으로 확장시킬 수 있다. 전압 수정을 추가시켜, 전력 조류 계산의 반복 과정은 더욱 빠르고 더욱 신뢰할 수 있다는 것이다[6].

보상 방법은 3상 불평형 계통으로 확장시킬 수 있다. 단락회로 해석을 위하여, 사고 보상은 혼합 보상으로 분지점 보상과 PV 노드 보상을 결합한 것이다.

이 연구에서 제시된 적응 방법은 일반적인 기기 모델과 다양한 운전조건을 고려한 빠르고 정확한 조류 계산이다. 이는 3상 불평형 계통의 보상 방법에 바탕을 두고 있다. 여기에서 다음과 같은 응용으로 확장시킬 수 있다.

- (a) 선로, 커패시터, 분산 발전설비, 비선형 부하, 변압기 접속을 포함한 분산계통 요소들은 알기 쉽게 모델이 된다.
- (b) 보상 전력 조류 방법의 수렴비율은 부하 불평형, 1-상 부하의 급작스런 변화, 매쉬(mesh) 분지점의 수와 위치, PV 노드의 수와 위치를 포함한 다양한 상황에 기준으로 활용하고 있다.
- (c) 적응 보상 의한 방법은 동적 시뮬레이션을 위하여 제시되고 수행되었다.

이에 덧붙여, 분산전원(dispersed generations)을 고려한 배전 시스템의 운전은 다양한 소비자 소유의 발전 설비가 있는 차세대 배전계통에 투입시 여러가지 문제점이 대두될 것이다. 이러한 장치들의 도입은 기존의 배전 자동화 기능의 운전 계획에 복잡성을 증가시킬 것이다. 전력시장의 탈규제화와 청정에너지(green energy)의 수행에 맞춰, 분산전원은 제한된 구역에서 소비자에게 전기를 제공할 것이며, 이는 발전사업자나 소비자 모두에게 매력적인 일일 것이다. 전력 공급자에 대한 규제가 느슨해 질 때, 많은 수의 분산 전원들이 전력계통에 도입될 것이고, 예상치 못했던 문제들이 전력계통 운영과 설계에서 분명하게 발생할 것이다. 분산전원은 배전 계통의 제어, 보호, 유지에의 복잡성을 증가시킬 것이다.

결국, 분산전원은 반드시 운전상의 문제점들을 방지하고 고품질전력을 제공하는 배전자동화시스템(DAS)으로 통합되어 제어되어야 할 것이다. DG 설비들은 공급되는 전력의 신뢰성과 품질을 개선하기 위해 협조적인 기능을 갖추어야 할 것이다[7].

미래형 배전계통에서 DG의 역할은 다음과 같이 예견할 수 있을 것이다.

- (a) 품질 개선 : 동적 전압의 보상, 피이드에 대한 전압 프로파일의 개선
- (b) 신뢰성 증진 : UPS기능과 지역복구서비스
- (c) 경제적 이득 : 상대적으로 높은 에너지효율, 손실감소, 부하의 평탄화

## 2. 조류 계산 알고리즘의 적용 사례

### 2.1 자코비안에 기반한 고전적 조류 해법

조류방정식의 축약된 집합은 일반 비선형 방정식의 집합에서 0을 찾기 위하여 몇몇 반복기법에 의하여 풀이 될 수 있을 것이다. 잘 알려진 뉴턴 방법은 다음과 같다.

#### 2.1.1 뉴턴 알고리즘

- 단계 1 : 해  $x_0$ 에 대하여 초기치를 선택한다.
- 단계 2 :  $k=0$ 를 놓는다.
- 단계 3 :  $F_k = F(x_k)$ 를 계산한다.
- 단계 4 : 만일  $\|F_k\| \leq \text{some tolerance}$ 이면 정지한다.
- 단계 5 : 자코비안  $J_k = \frac{\partial F}{\partial x} |_{x_k}$ 을 계산한다.
- 단계 6 :  $J_k s_k = -F_k$ 를 푼다.
- 단계 7 :  $x_{k+1} = x_k + s_k$ 로 놓는다.
- 단계 8 :  $k=k+1$ 로 놓고 단계 3으로 돌아간다.

이는 뉴턴법의 전형으로 대부분의 계산시간은 자코비안을 계산하는 단계 5와 갱신 단계를 푸는 단계 6에서 소비한다. 이 두 단계에서 계산시간을 줄이기 위하여 합당하게 근사화시키면 알고리즘의 속도를 크게 향상시키며 전체 반복수의 증가를 막을 수 있으며, 분지에 해당하는 블록 요소에 의하여 자코비안을 생각할 수 있다. 블록 행  $i$ 와 블록 행  $j$ 의 블록 요소는 분지  $j$ 의 말단전압의 변화에 대하여 분지  $i$ 에서 전압 불일치의 민감도이다. 시스템 자코비안의 각 블록요소는 분지  $i$ 의 시작모선과 분지  $j$ 의 말단모선 사이의 경로를 따라 지로 자코비안의 곱으로서 연쇄 법칙(chain rule)을 사용하여 표시할 수 있다.

#### 2.1.2 지로 자코비안(Branch Jacobian)의 수치적인 구조

지로 자코비안  $G_k$ 는 모선  $k$ 에서 전압과 전류의 작은 변화와 모선  $k-1$ 에서 전압과 전류의 민감도와 관련된다. 실제 배전 선로에 대하여 선로 임피던스 행렬  $Z_k$ 와 선로 충전 어드미턴스  $Y_k$ 의 요소가 전압의 크기에 비하여 작은 사실 때문에 지로 자코비안은 단위행렬(identity matrix)로 근사화 할 수 있다.

모선  $k$ 에서 전압의 작은 변화는 지로  $k$ 의 시리즈전류(series current)뿐만 아니라 모선  $k$ 의 부하, 분로, cogenerator 전류의 작은 변화에 영향을 받는다. 그러나, 이 전류는 모선  $k-1$ 의 전압변화를 무시하고 작은 선로 임피던스  $Z_k$ 에 의하여 곱하여진다. 그래서, 두 번째 항을 무시하여 모선  $k$ 의 전압변화가 모선  $k-1$ 의 전압변화와 거의 같게 일어난다는 것을 알 수 있다. 이는  $G_k$ 의 맨 위의 왼쪽 블록에 해당한다.

유사하게, 전류  $I_{k+1}$ 의 작은 변화는 단지  $I_k$ 에만 영향을 주며,  $G_k$ 의 맨 위의 오른쪽 블록에 대하여 거의 0으로 근사화하여 전압  $V_{k-1}$ 의 영향을 무시할 수 있을 것이다. 작은  $Y_k$ 에 대하여  $V_k$  또는  $I_{k+1}$ 의 작은 변화가  $G_k$ 의 가장 아래 2개의 블록을 참조해 보면 첫 번째 항에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

단위에 의한 지로 자코비안의 근사는 부하, 분로 커패시터, 일정 주입전류에 의한 cogenerator를 대신하고 선로 충전과 선로 임피던스를 무시하여 등가화 하는 것이다.

꼭 같이 근사는 단로기에도 적용할 수 있다. 변압기

색선에 대한  $G_k$ 의 위의 왼쪽 블록은 탭 비에 의하여 나누어지는 단위로 근사화 할 수 있으며, 단위에 의한 아래 오른쪽 블록은 탭 비가 곱해진다.

반면, 변압기는 이상적인 등가로 근사화 할 수 있을 것이다. 이는 이 근사가 뉴턴 방법의 갱신 단계를 계산하기 위하여 사용된 자코비안을 단지 단순화하였다는 것이다. 이는 최종의 해에는 영향을 미치지 않을 것이다.

#### 2.1.3 시스템 자코비안의 수치적인 구조

지로 자코비안의 수치적 구조를 고려해보면 알 수 있듯이 연쇄 법칙으로 시스템 자코비안을 형성할 수 있다.

#### 2.1.4 분할 알고리즘(Decoupled Algorithm)

대각 블록 아래의 영이 아닌 블록(nonzero block)이 거의 0에 가깝게 되기 때문에 이것을 무시할 수 있다. 이렇게 함으로서 근본적으로 분지  $i$ 에 대한 차이가 분지  $i$ 의 말단전압과 분지  $i$ 의 모체의 말단전압에만 영향을 미칠 수 있을 것이라고 본다. 이러한 근사화는 뉴턴 알고리즘의 단계 6의 갱신 단계에서 해를 얻는데 속도를 크게 증가시킬 수 있다고 본다. 이 행렬은 지금 더욱 산재(sparse) 되어있지만, 더욱이 이는 상위 블록을 삼각화하며, 갱신 단계에서는 블록의 후진-대입에 의하여 풀 수 있다.

#### 2.1.5 고속 분할 알고리즘(Fast Decoupled Algorithm)

분할 알고리즘에서 단계 5의 자코비안의 계산은 여전히 아주 복잡하고 시간이 많이 든다. 정확한 단위 행렬에 의한 주위의 단위 블록과 정확한 음의 단위행렬에 의하여 주위의 음의 단위 블록을 대치함으로써 더욱더 근사화 할 수 있다. 정확한 단위 블록은 실제적으로 변압기를 포함한 분지에 해당하는 블록에 대하여 적당한 탭 비로 나누어 질 수 있다. 지금 위에서 언급한 바와 같이, "Jacobian"은 지로 자코비안에 의해 이루어지고 근사에 해당하는 일정한 상 삼각 행렬이다. 이는 단계 5가 근본적으로 없어지고, 단계 6이 지금 단순한 후진-대입에 의하여 실행되는 것이다. 사실, 이는 각 행이 대각에 "1"과 모체 분지의 적당한 상에 해당하는 열에 "-1"을 가지고 있기 때문에 명확한 형태나 "Jacobian"으로 저장할 필요가 없다. 여기서 다시 "1"은 적당한 변압기 탭 비에 상응하는 역수(reciprocal)에 의하여 대체할 수 있다.

### 2.2 DG를 고려한 보상기법 조류계산 알고리즘

분산전원을 고려한 3상 조류계산을 위한 보상 기법에 기반한 조류계산 알고리즘의 주요 절차는 다음과 같다.

- 1단계 : 네트워크 데이터를 읽어서 네트워크 인덱스를 붙인다.
- 2단계 : 분지점(breakpoint) 임피던스 행렬  $Z_B$ 와 PV 노드 감도행렬  $Z_V$ 를 구성한다. 약한(weakly) 메시 계통은 모든 루프의 분지점을 분리하여 방사상 계통으로 변환할 수 있다.  $Z_B$ 내에서, 대각선 요소는 선로임피던스의 합이다. 이는 분지점 2개의 모선을 연결하여 루프를 만들 수 있다. 그리고, 비대각 요소는 2개의 분지점 루프에 대하여 공통 선로의 임피던스의 합이다.  $Z_V$ 는  $Z_B$ 와 유사한 방식으로 PV로부터 피이드 노드까지로 하여 형성할 수 있다.
- 3단계 : 후진 전류와 전진 전압에 대하여 스위프(sweep) 반복을 수행한다. 만일 모든 상에 대하여 각 노드의 최대 전력 편차(mismatch)가 전력 수렴 기준  $\epsilon_p$  이하가 되면, 다음 단계로 넘어간다.

4단계 : 분지점 전압 편차  $\Delta V_B$ 를 계산한다. 2개의 끝 노드  $k$ 과  $l$ 로 분리되는 분지점  $j$ 에 대하여, 다음과 같이 놓는다.

$$\Delta V_{B,j} = V_k - V_l \quad (1)$$

5단계 : 만일 최대 분지점 전압 편차가 분지점 전압 수렴 기준  $\epsilon_b$ 보다 크다면, 분지점 전류 주입  $J$ 를 갱신하고, 단계 3으로 되돌아간다. 그렇지 않으면, 다음 단계로 간다.

$$Z_B \Delta J = \Delta V_B \quad (2)$$

$$J = J + \Delta J \quad (3)$$

분지점  $j$ 에 대하여, 전류보상  $-J_j$ 는 끝 노드  $k$ 에 주입되고, 전류 보상  $J_j$ 는 끝 노드  $l$ 에 주입한다.

6단계 : PV 노드 전압 편차  $\Delta V_v$ 를 계산한다. PV 노드  $i$ 에 대하여,

$$\Delta V_{V,i} = V_{set,i} - V_{1,i} \quad (4)$$

여기서,  $V_{1,i}$ 는 노드  $i$ 에서 양의 시퀀스 전압의 크기이다.  $V_{set,i}$ 는 PV 노드  $i$ 에서 전압 집합의 값이다.

7단계 : 만일 최대 PV 노드 전압 편차가 PV 노드 전압 수렴 기준  $\epsilon_v$ 보다 크다면, PV 노드 전류 주입  $I_q$ 를 갱신한 다음, 단계 3으로 되돌아간다. 그렇지 않으면, 최종 조류는 다음과 같은 식으로 된다.

$$Z_V \Delta I_q = \Delta V_V \quad (5)$$

$$\Delta i_{qa,i} = |\Delta i_{q,i}| e^{j(90^\circ + \delta_{m,i})}$$

$$\Delta i_{qb,i} = |\Delta i_{q,i}| e^{j(90^\circ + \delta_{m,i})} \quad (6)$$

$$\Delta i_{qc,i} = |\Delta i_{q,i}| e^{j(90^\circ + \delta_{m,i})}$$

이는 무효전력 발생을 감소시킬 수 있는 90° 전상전류이다. 만일  $\Delta V_{V,i} < 0$  ( $V_{1,i}$ 는  $V_{set,i}$ 보다 크다)이라면,

$$I_{q,i} = I_{q,i} + \Delta I_{q,i} \quad (7)$$

무효전력 발생은 PV 노드  $i$ 에 적게 주입될 것이다. 만일  $\Delta V_{V,i} > 0$  ( $V_{1,i}$ 는  $V_{set,i}$ 보다 적다) 이라면,

$$I_{q,i} = I_{q,i} - \Delta I_{q,i} \quad (8)$$

무효전력 발생은 PV 노드  $i$ 에 더 많이 주입될 것이다.

### 2.3 DG를 고려한 적응보상기법 알고리즘

DG가 포함된 3상 조류계산을 위하여 제시된 보상기법 조류계산 알고리즘에 바탕을 둔, 새로운 적응 보상 전력 조류 방법은 동적 시뮬레이션에 사용할 수 있다. 이 적응 보상 조류계산 알고리즘은 다음과 같이 표시할 수 있다.

1단계 : 시간 간격  $\Delta t_i$ 는 다음과 같이 조류계산 시 이전의 반복수  $n_{i-1}$ 에 기준하여 바뀌어진다.

만일  $n_{i-1} = 1$ 이면,  $\Delta t_i = 1.5 \Delta t_{i-1}$

만일  $n_{i-1} = 2$ 이면,  $\Delta t_i = \Delta t_{i-1}/1.2$

만일  $n_{i-1} \geq 3$ 이면,  $\Delta t_i = t_{min}$

$\Delta t_i$ 는  $[t_{min}, t_{max}]$ 에 제한된다.

2단계 : 후진/전진 스위프 반복에 대하여, 만일 앞의 계산된 분지점 전압 편차가  $\Delta V_B$  또는 PV 노

드 전압 편차  $\Delta V_V$ 가 상용하는 수렴 기준의 10배 이상이려면, 단지 후진/전진 반복만을 수행한다. 그렇지 않으면, 최대 전력 편차가 전력 수렴 기준  $\epsilon_p$ 보다 적어질 때까지 반복을 계속한다.

3단계 : 분지점의 전압 편차와 보상 전류를 계산한다. 만일 앞에서 계산된 PV 노드 전압 편차  $\Delta V_V$ 가 PV 수렴 기준의 10배 이상이려면, 단지 분지점에서 한번의 반복만을 수행한다. 그리고 다음 단계로 진행한다. 그렇지 않으면, 수렴이 얻어질 때까지 단계 2와 3을 반복한다.

4단계 : PV 노드의 전압 편차와 보상 전류를 계산한다. 수렴이 될 때까지 단계 2, 3, 4를 반복한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 현재 국내-외 논문을 참조하여 배전 계통에 적용된 조류계산 알고리즘의 적용사례를 조사하였다. 분산전원이 포함된 경우의 3상 조류계산은 보상기법 조류계산 알고리즘에 바탕을 둔, 새로운 적응 보상 전력 조류 방법을 사용하여 동적 시뮬레이션을 할 수 있어야 한다. 이러한 상황에 적용할 수 있는 미래의 배전 계통에 대하여 적용 가능한 알고리즘으로 적응 보상 방법은 보상 방법으로 수렴의 성질을 활용하여 배전 전력 조류 해석에 적용한 논문이었다. 이는 적응 보상 방법이 더욱 빠르고 더욱 강인하다는 것을 제시된 논문에서 강조하였다.

이와 보조를 맞추어 미래형 배전계통을 설계하기 위한 조류계산 알고리즘은 네트워크 영향을 고려한 다소 복잡하고 구조에 있어 다소 송전계통과 유사한 형태인 radial과 loop가 혼재된 배전용 조류계산 알고리즘을 계속 연구하여야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] W. F. Tinny and C. E. Hart, "Power flow solution by Newton's method", *IEEE Trans.*, PAS-86, pp. 1449-1456, 1967.
- [2] B. Stott and O. Alsac, "Fast decoupled load flow", *IEEE Trans.*, PAS-93, pp. 859-869, 1974.
- [3] D. Rajicic and A. Bose, "A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios", *IEEE Trans.*, PWR-3, pp. 743-746, 1988.
- [4] S. Iwamoto and Y. Tamura, "A load flow calculation method for ill-conditioned power systems", *IEEE Trans.*, PAS-100, pp. 1736-1713, 1981.
- [5] R. D. Zimmerman and H. D. Chiang, "Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems", *IEEE Trans.*, on *Power Systems*, vol. 10, No. 4, pp. 2045-2052, Nov., 1995.
- [6] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation", *IEEE Trans.*, on *Power Delivery*, vol. 17, No. 3, pp. 822-827, July, 2002.
- [7] J. H. Choi, J. C. Kim and S. I. Moon, "Integrating operation of dispersed generation to automation distribution center for distribution network reconfiguration", *KIEE International Transactions on PE*, vol. 2-A, No. 3, pp. 102-108, 2002.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.