

독립사업부제를 대비한 분산형 배전용 조류계산 알고리즘

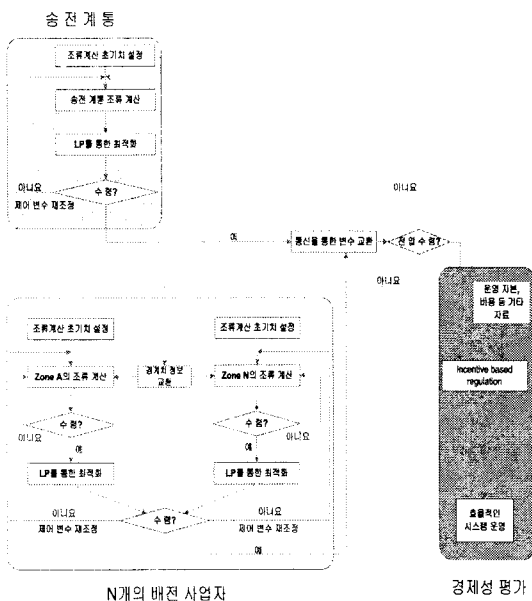
\*김동현 \*노디르 노베크프 \*이호철 \*윤용태 \*\*이상성 \*\*\*이송근  
\*서울대학교 전기컴퓨터공학부, \*\*기초전력연구원, \*\*\*전주대학교

Distributed Load Flow Algorithm for Power Distribution System under Strategic Business Unit

\*D. H. Kim \*Nodir Norbekov \*H. C. Lee \*Y. T. Yoon \*\*S. S. Lee \*\*\*S. K. Lee  
\*Seoul National Univ., \*\*PSRD and RERI of KESRI, \*\*\*JeonJu Univ.

**Abstract** - 배전 독립사업부제 도입 및 분산전원의 출현으로 배전계통은 계획 및 운영에 있어서도 변화가 일어날 것이다. 예로, 기존의 방사상 구조의 배전 계통은 분산 전원의 출현으로 부분적인 그물망 구조로 변형될 수 있으며, 사업 구역이나 사업 지역으로 나누어진 배전 계통에서는 서로 다른 관리 체제 하에서 운영이 필요하기 때문에 각 배전계통간의 정보 공유 문제가 발생할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 분화된 배전 계통의 특성을 고려하여 송전계통과 같이 전체 시스템에 대해 조류 계산하지 않고 배전 계통을 몇 개의 영역으로 나누고 다른 영역과의 연계 정보만을 이용하여 자신의 영역에 대한 조류 계산을 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 이런 특성을 최대한 반영한 각 영역의 조류 계산은 분산 전원의 투입으로 인한 양방향 조류가 발생하게 되므로 그물망 구조로 된 구역과 기존의 방사상 구조로 된 영역으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 구역 특성에 맞고 배전 계통에 적용 가능한 알고리즘으로 먼저 분리 구역별 조류 계산을 수행한 후 그 다음 경제치 교환으로 배전 계통 전체의 조류 계산을 수행하는 알고리즘을 제안한다. 즉, 방사상 구조 영역에서는 back/forward sweep 방법으로 수행하고 그물망 구조 영역에서는 Full Newton-Raphson 방법으로 구분하여 영역의 특성에 맞게 수행하였다.

예상하여 그려본 블록다이어그램이다. 본 논문에서는 향후 변화하는 배전 계통의 환경에 대비하여 분산형 조류계산의 알고리즘을 제안하고 이를 수정된 IEEE 37-bus 모델에 적용하였다.



1. 서 론

2006년 9월 1일에 제정된 배전 독립사업부제(Strategic Business Unit : SBU)는 각 단위별로 자율적인 운영권을 가지면서 비용 등에 대해서도 스스로 책임지도록 하는 제도이다. 배전계통의 사업구역 분할로 시작된 배전 사업부제는 독립 재무제표를 통해 경영실적이 드러나기 때문에 경영혁신과 원가절감 경쟁을 유도할 수 있다는 게 특징이다. 이런 제제의 변화는 계획 및 운영 시스템에도 새로운 변화가 필요하게 될 것이고 각 배전 사업부간의 정보 공유에도 문제가 발생할 수도 있다. 또한 지금까지의 배전계통은 대부분 단순히 방사상 구조를 가지고 있으며, 변전소를 통하여 전력을 수전하는 역할만 수행하였지만 분산전원(열병합 등 여러 규모의 발전설비)의 출현으로 일부 구간이 환상형을 가진 구조가 되거나 자체적으로 계통을 운영할 수 있게 되어 더욱 복잡한 형태가 될 것이다.

조류 계산은 계통 운영에 있어서 기본이 되는 정보를 제공해 줄 수 있다. 분화된 배전 계통 하에서는 배전 사업부 전체의 조류 계산을 하는 것이 아니라 각각의 배전 사업부의 조류 계산을 수행한 후 전체의 조류 계산 결과를 얻는 것이다. 이러한 정보를 바탕으로 사업부간의 정보 공유의 문제를 해결하고 배전 사업부의 독립적인 계통의 운영에도 도움을 줄 수 있다. 그림 1은 이러한 분산형 배전 조류계산이 경제적 운영시스템과 결합하여 개개의 배전 사업부의 효율적인 운영에 활용할 수 있음을

<그림 1> 분산형 배전 조류 계산 블록다이어그램

2. 분산형 배전 조류 계산

2.1 배전용 조류 계산 기법

배전 계통에서는 저항 대 리액턴스 비율이 높기 때문에 송전 계통에서 널리 적용되는 P-Q fast decoupled 방법을 사용할 수 없다[1]. 또한 구역마다 서로 다른 특성을 가지고 있기 때문에 단순히 계통 전체의 조류 계산을 수행하는 것이 아니라 계통을 여러 개의 영역으로 나누고 영역의 특성에 맞춰 각각 조류 계산을 수행한 후 서로 연결되는 부분의 경제치를 가지고 전체 계통의 조류 계산을 수행하는 것이 더 효율적일 것이다.

2.1.1 Full Newton-Raphson 방법

배전 계통에서는 기존의 송전 계통에서 사용하는 P-Q fast decoupled 방법이 아닌 full Newton-Raphson 방법이며 그 절차는 아래와 같다[2].

1) 나누어진 영역의 자코비안 행렬을 구한다.

$$J_a = \begin{pmatrix} \frac{\delta P}{\delta \theta} & \frac{\delta P}{\delta V} \\ \frac{\delta Q}{\delta \theta} & \frac{\delta Q}{\delta V} \end{pmatrix}_a \quad a=1,2,\dots,n \quad (1)$$

여기서  $J_a$ 는  $a$  영역의 자코비안 행렬이다.

2) 상태 변수의 변화량을 구한다.

$$\Delta x_a = J_a^{-1} \Delta S_a \quad a=1,2,\dots,n \quad (2)$$

여기서  $\Delta x_a$ 는 영역 내부의  $\theta$ 와  $|V|$ 의 변화량이고,  $\Delta S_a$ 는 영역 내부의  $P, Q$ 의 변화량이다.

3) 상태 변수들을 수정하고 수렴 조건이 만족하는지 검사한다.

$$x_a^{k+1} = x_a^k + \Delta x_a \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 iteration 수를 나타내며 수정된 상태 변수들을 통해 나온  $P, Q$  값을 가지고 수렴 조건을 만족하는지 판단한다. 이 때 수렴하지 않으면 다시 (1), (2), (3)의 과정을 반복하고, 수렴하면 조류 계산을 마친다.

### 2.1.2 Back/Forward sweep 방법

대부분의 배전 계통은 일반적으로 방사상의 구조를 갖고 있기 때문에 방사상 구조에 적합한 더 효과적인 조류 계산 알고리즘을 적용하는 것이 더 유리하다. 본 논문에서 방사상 구조에 적합한 알고리즘은 상전류를 이용한 back/forward sweep 방법을 선택하였다. 이 알고리즘은 빠르고 수렴성이 좋으며 기억 메모리 사용이 적다는 장점이 있다[3]. 그 절차는 아래와 같고 모든 변수는 복소수이다.

1) 먼저 각 노드의 부하에 유입되는 부하전류를 구한다.

$$I_i^k = (S_i^k / V_i^k)^* \quad k=1,2,3\dots n \quad (4)$$

여기서,  $I_i^k$ 는 노드  $i$ 의 부하로 유입되는 전류이고,  $S_i^k$ 는 노드  $i$ 의 전력이고,  $V_i^k$ 는 노드  $i$ 의 전압이며,  $k$ 는 iteration 수를 나타낸다.

2) 선로전류를 Backward sweeping을 통해 구한다.

$$J_i^k = I_i^k + \sum_{m \in M} J_m^k \quad (5)$$

여기서,  $J_i$ 는 노드  $i$ 와 노드  $i-1$ 사이의 선로에 흐르는 전류이고,  $J_m$ 은 노드  $i$ 와 노드  $i+1$ 사이의 각 선로에 흐르는 전류이고,  $M$ 은 노드  $i$ 에 연결되어 있는 모든 Branch의 수이다. 결국 위 식을 통해서 각 선로에 흐르는 전류의 양을 알 수 있다.

3) 노드전압을 Forward sweeping을 통해 구한다.

$$V_i^k = V_{i-1}^k - Z_j J_i^k \quad (6)$$

여기서,  $Z_j$ 는 노드  $i-1$ 과 노드  $i$  사이의 선로임피던스이다. 위 식을 통해서 각 노드전압을 slack bus에서부터 차례로 구할 수 있다.

위 (4), (5), (6) 식을 계속 반복 수행하면서 수렴범위 안으로 들어오면 조류 계산을 마친다.

### 2.2 분산 알고리즘을 이용한 배전 계통 조류 계산

배전 계통 전체의 조류 계산을 수행할 때에 영역의 특성에 맞게 조류 계산을 나누어서 수행하였을 경우, 영역이 서로 맞물리는 경계치 부분의 처리와 전체 계통의 조류 계산을 수행하는 절차는 아래와 같다.

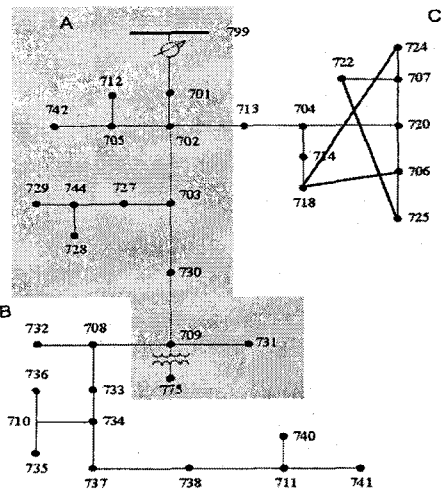
- 1) 나누어진 영역 특성에 맞는 조류 계산 방법을 선택한다.
  - 2) Full Newton-Raphson 방법을 적용할 영역의 경계치 노드를 slack bus ( $|V|=1, \theta=0$ )로 둔다.
  - 3) 2)에서 선택된 영역에 한해 조류 계산을 수행한다.
  - 4) 3)에서 얻은 경계치 결과(slack bus로 지정한 노드의  $P, Q$ )를 통신을 통하여 전달한다.
  - 5) 경계치 부분을 하나의 부하로 보고 back/forward sweep 방법을 적용한다.
  - 6) 4)에서 구한 경계치 결과를 통신을 통하여 전달하고 그 결과를 가지고 3)에서 얻은 조류 계산 결과를 수정한다.
- $$|V_m| = |V_m| \cdot |V_s| \quad (7)$$
- $$\theta_m = \theta_m + \theta_s \quad (8)$$

여기서  $m$ 은 Full Newton-Raphson 방법을 적용한 영역의 노드를 말하며,  $s$ 는 slack bus로 지정한 노드를 말한다.

이러한 구상으로 각 사업부가 운영이 된다면 일명 분산 급전지령소(distributed dispatching center)로서 역할을 하는 부분이 필요하며, 구역 데이터 처리(localized data processing)을 통해 운영이나 모니터링 및 제어를 용이하게 할 수 있다.

### 3. 사례 연구

본 논문에서는 조류 계산 알고리즘을 검증하기 위해 그림 2와 같은 IEEE 37-bus 모델 계통의 일부를 수정하여 일정 영역을 그물망 구조로 만든 모델을 사용하였다. 조류계산은 3개의 영역으로 나뉘어 수행하였다[4].



<그림 2> IEEE 37보선의 수정 배전 계통도

그리고 아래 표 1은 각 노드 부하의 p.u. 값, 표 2는 선로 저항과 임피던스 값을 나타내었다.

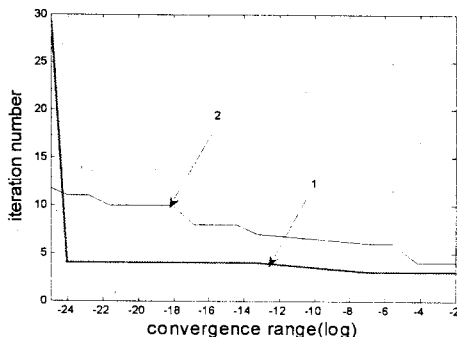
| Bus | P     | Q     | Bus | P     | Q     |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 735 | 0.85  | 0.4   | 707 | 0.0   | 0.0   |
| 710 | 0.0   | 0.0   | 724 | -0.42 | -0.21 |
| 736 | 0.42  | 0.21  | 722 | -1.61 | 0.8   |
| 734 | -0.42 | -0.21 | 731 | 0.85  | -0.4  |
| 737 | -1.4  | -0.7  | 775 | 0.0   | 0.0   |
| 738 | -1.26 | -0.62 | 709 | 0.0   | 0.0   |
| 711 | 0.0   | 0.0   | 730 | -0.85 | -0.4  |
| 740 | -0.85 | -0.4  | 703 | 0.0   | 0.0   |
| 741 | -0.42 | -0.21 | 727 | -0.42 | -0.21 |
| 733 | -0.85 | -0.4  | 744 | -0.42 | -0.21 |
| 732 | -0.42 | -0.21 | 729 | -0.42 | -0.21 |
| 708 | 0.0   | 0.0   | 728 | -1.26 | -0.63 |
| 713 | 0.0   | 0.0   | 702 | 0.0   | 0.0   |
| 704 | 0.0   | 0.0   | 705 | 0.0   | 0.0   |
| 714 | -0.38 | -0.18 | 742 | -0.93 | -0.44 |
| 718 | -0.85 | -0.4  | 712 | -0.85 | -0.4  |
| 720 | -0.85 | -0.4  | 701 | -6.3  | -3.15 |
| 706 | 0.0   | 0.0   | 725 | -0.42 | -0.21 |

<표 1> 각 노드 부하의 p.u. 값

| i   | j   | r        | x        | i   | j   | r        | x        |
|-----|-----|----------|----------|-----|-----|----------|----------|
| 701 | 702 | 0.000200 | 0.000136 | 711 | 740 | 0.000042 | 0.000028 |
| 702 | 705 | 0.000083 | 0.000057 | 713 | 704 | 0.000108 | 0.000074 |
| 702 | 713 | 0.000075 | 0.000051 | 714 | 718 | 0.000108 | 0.000074 |
| 702 | 703 | 0.000275 | 0.000187 | 720 | 707 | 0.000192 | 0.00013  |
| 703 | 727 | 0.000050 | 0.000034 | 720 | 706 | 0.000125 | 0.000085 |
| 703 | 730 | 0.000125 | 0.000085 | 727 | 744 | 0.000058 | 0.000004 |
| 704 | 714 | 0.000017 | 0.000011 | 730 | 709 | 0.000042 | 0.000028 |
| 704 | 720 | 0.000167 | 0.000113 | 733 | 734 | 0.000117 | 0.000079 |
| 705 | 742 | 0.000067 | 0.000045 | 734 | 737 | 0.000133 | 0.000091 |
| 705 | 712 | 0.000050 | 0.000034 | 734 | 710 | 0.000108 | 0.000074 |
| 706 | 725 | 0.000058 | 0.000040 | 737 | 738 | 0.000083 | 0.000057 |
| 707 | 724 | 0.000158 | 0.000108 | 738 | 711 | 0.000083 | 0.000057 |
| 707 | 722 | 0.000025 | 0.000017 | 744 | 728 | 0.000042 | 0.000028 |
| 708 | 733 | 0.000067 | 0.000045 | 744 | 729 | 0.000058 | 0.000004 |
| 708 | 732 | 0.000067 | 0.000045 | 775 | 709 | 0.000002 | 0.000001 |
| 709 | 731 | 0.000125 | 0.000085 | 799 | 701 | 0.000386 | 0.000262 |
| 709 | 708 | 0.000067 | 0.000045 | 725 | 722 | 0.000125 | 0.000085 |
| 710 | 735 | 0.000042 | 0.000028 | 718 | 706 | 0.000108 | 0.000074 |
| 710 | 736 | 0.000267 | 0.000181 | 718 | 704 | 0.000386 | 0.000262 |
| 711 | 741 | 0.000083 | 0.000057 |     |     |          |          |

<표 2> 각 선로 저항과 임피던스

위 정보를 가지고 계통 전체를 Full Netwon-Raphson 방식으로 조류 계산을 수행한 것(방식1), 그리고 영역을 나누고 영역의 특성에 따라 Back/Forward sweep방법과 Full Netwon-Raphson 방법을 따로 수행한 것(방식2)의 결과를 아래 표 3에 나타내었다. 또한 각 알고리즘의 수렴 범위에 따른 iteration 횟수를 그림 3에 나타내었다.



<그림 3> 수렴 범위에 따른 iteration 횟수

| Bus | 방식 1    |          | 방식 2    |          |
|-----|---------|----------|---------|----------|
|     | $ V $   | $\theta$ | $ V $   | $\theta$ |
| 701 | 1.01070 | 0.08726  | 1.01070 | 0.08726  |
| 702 | 1.01460 | 0.11944  | 1.01460 | 0.11944  |
| 705 | 1.01480 | 0.12120  | 1.01480 | 0.12120  |
| 712 | 1.01490 | 0.12170  | 1.01490 | 0.12170  |
| 742 | 1.01490 | 0.12189  | 1.01490 | 0.12189  |
| 703 | 1.01770 | 0.14428  | 1.01770 | 0.14428  |
| 727 | 1.01790 | 0.14554  | 1.01790 | 0.14554  |
| 744 | 1.01800 | 0.14263  | 1.01800 | 0.14263  |
| 729 | 1.01800 | 0.14205  | 1.01800 | 0.14205  |
| 728 | 1.01810 | 0.14312  | 1.01810 | 0.14312  |
| 730 | 1.01870 | 0.15240  | 1.01870 | 0.15240  |
| 709 | 1.01900 | 0.15455  | 1.01900 | 0.15455  |
| 775 | 1.01900 | 0.15455  | 1.01900 | 0.15455  |
| 731 | 1.01910 | 0.15577  | 1.01910 | 0.15577  |
| 708 | 1.01930 | 0.15744  | 1.01930 | 0.15744  |
| 732 | 1.01940 | 0.15770  | 1.01940 | 0.15771  |
| 733 | 1.01970 | 0.16006  | 1.01970 | 0.16016  |
| 734 | 1.02020 | 0.16360  | 1.02020 | 0.16384  |
| 710 | 1.02000 | 0.16205  | 1.02000 | 0.16223  |
| 736 | 1.01980 | 0.16096  | 1.01990 | 0.16109  |
| 735 | 1.01990 | 0.16167  | 1.02000 | 0.16183  |
| 737 | 1.02080 | 0.16916  | 1.02090 | 0.16962  |
| 738 | 1.02110 | 0.17148  | 1.02120 | 0.17202  |
| 711 | 1.02130 | 0.17267  | 1.02130 | 0.17327  |
| 740 | 1.02130 | 0.17306  | 1.02140 | 0.17367  |
| 741 | 1.02130 | 0.17303  | 1.02140 | 0.17364  |
| 713 | 1.01510 | 0.12311  | 1.01510 | 0.12311  |
| 704 | 1.01570 | 0.12854  | 1.01570 | 0.12870  |
| 714 | 1.01580 | 0.12885  | 1.01580 | 0.12903  |
| 718 | 1.01610 | 0.13093  | 1.01610 | 0.13117  |
| 720 | 1.01610 | 0.13280  | 1.01620 | 0.13309  |
| 706 | 1.01620 | 0.13180  | 1.01620 | 0.13207  |
| 725 | 1.01630 | 0.13182  | 1.01630 | 0.13209  |
| 707 | 1.01630 | 0.13076  | 1.01640 | 0.13099  |
| 722 | 1.01640 | 0.13128  | 1.01640 | 0.13153  |
| 724 | 1.01630 | 0.13128  | 1.01640 | 0.13152  |

<표 3> 적용 알고리즘의 조류 계산 결과

#### 4. 결론

본 논문에서는 운영상의 편의를 위해 각 사업부별로 나누어 지는 배전계통에 대하여 계통 특성에 맞게 조류계산을 수행하고 그 결과로 전체 계통의 조류 계산을 수행할 수 있는 분산형 알고리즘을 제안하였다. Back/forward sweep방법은 Newton-Raphson 방법과 달리 matrix inversion과정이 없어 수렴 경계치시 발산할 가능성이 없고 이에 incomplete information에 대해 robust한 조류계산방식이다. 그 이외에도 radial network의 구조상 특성을 이용하기 때문에 3상 비대칭 선로 조류계산에도 더 나은 performance를 보일 것으로 예상되어 이에 대한 연구가 진행중이다. 본 논문에서 제안한 distributed load flow with mixed numerical approach는 Strategic Business Unit의 구조적 변화와 distributed generator출현에 따른 배전계통의 시스템변화를 고려하면서도 computational advantage를 개선하는 보다 나은 조류계산방식이다.

#### [참고 문헌]

- [1] M. Shahidepour, Y. Wang, "Communication and Control in Electric Power Systems", Wiley Inter-Science, 2003.
- [2] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, "Power Systems Analysis", Prentice-Hall, 2000.
- [3] Carol S. Cheng, Dariush Shirmohammadi, "A Three-phase Power Flow Method for Real-time Distribution System Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May, 1995.
- [4] W. H. Kersting, "Radial Distribution Test Feeders", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, Issue 3, pp. 975-985, Aug., 1991.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며 관계 기관에 감사드립니다.