

분산전원을 포함하는 배전계통을 위한 전력조류계산 기법의 개발

김 홍래, 이 광기, 권 형석
 순천향대학교 전기공학과

Power Flow Analysis for Distribution Systems with Distributed Generation

Hongrae Kim, Koangkee Lee, Hyung-Seok Kwon
 Dept. of Electrical Engineering, Soonchunhyang University

Abstract - 본 논문에서는 분산전원을 포함하는 배전계통을 위한 3상 조류계산 프로그램에 대하여 소개한다. 이 프로그램은 배전계통의 방사상 구조를 가정하여 개발된 것이 아니므로 어떠한 구조로 구성된 배전계통이라도 모두 사용이 가능하며, 불평형 부하 및 불평형 선로를 포함하는 계통에 대해서도 해를 구할 수 있도록 고안되었다. Voltage regulator는 각 상별로 tap을 조정할 수 있는 3상 변압기로 모델링하였으며, 분산전원은 계통 내 다양한 위치에 배치하여 수렴특성을 확인하였다. 3상 불평형 부하와 단상 및 2상 선로를 포함하는 20모선 시험계통을 구성하여 수행한 사례연구에서 조류계산 프로그램은 가혹한 증부하 환경에서도 훌륭한 수렴특성을 보여주었다.

1. 서 론

배전계통은 전력을 사용하는 최종 소비자와 직접 연결되어 있는 전력계통으로, 전력공급의 신뢰성 확보, 계통 운용의 안정성 계고 등에 있어서 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 그간 우리나라를 포함한 세계 여러 나라에서 배전계통 운용의 효율화를 위하여 배전자동화(distribution automation)나 수요측 관리(demand side management) 등의 계획을 꾸준히 진행하여 왔다.

최근에는 세계 각 국의 전력산업 구조개편과 맞물려 배전계통의 효율적, 안정적 운용에 대한 필요성이 더욱 크게 부각되고 있다. 또한 안정적인 전력수급 대책을 확보하거나 에너지 환경의 변화에 대응하기 위하여 배전계통 내에 도입되고 있는 다양한 형태의 분산전원(distributed generation)에 대한 논의도 활발하게 진행되고 있다. 이러한 상황에서 분산전원을 포함하는 복합배전계통을 효율적으로 운용하기 위한 배전계통 해석 기술의 개발은 필수적인 것이라 할 수 있다. 계통 계획과 해석을 위한 가장 필수적인 도구는 조류계산이라고 할 수 있으며, 복합배전계통을 위한 안정적인 전력조류계산 프로그램의 개발은 시급한 과제이다.

본 논문에서는 배전계통의 선로구성 형태에 관계없이 모든 배전계통에 적용할 수 있는 범용 조류계산 프로그램을 소개하며, 지금까지 개발된 여러 가지 계통 모델링 기법이나 연산기법을 사용하여 알고리즘을 구현하였다. 사례연구를 위하여 임의로 구성된 20모선 시험계통을 이용하여 조류계산 알고리즘의 타당성과 수렴특성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 배전계통 조류계산의 연구동향

송전계통과 같이 3상 평형상태를 가정하는 전력계통에 대한 조류계산 연구는 오랜 역사를 가지고 있으며, 실계통에서도 이미 안정된 운용상태를 유지하고 있다[1, 2]. 그러나, 단상이나 2상 선로가 존재하고 부하도 3상

간에 균등 배분되지 않는 배전계통의 특성 상 배전계통의 계획과 운영을 위해서는 배전계통을 위한 특별한 조류계산이 필요하다. 일반적으로 배전계통은 방사상으로 구성되고 급전선의 시작 부분에 유일한 전원을 갖는 형태로 구성된다. 따라서, 배전계통에서의 전력조류는 변전소로부터 계통의 말단 방향으로 일정하게 흐르게 되며, 이러한 배전계통의 특성을 이용한 배전계통 조류계산 기법들이 많이 연구되어 왔다[3-5].

90년대 중반 이후 세계적으로 분산전원에 대한 관심이 증대되고 배전계통 내에 이러한 분산전원의 설치가 늘어나면서 기존의 단방향 전력조류를 가졌던 배전계통 조류계산은 더 이상 타당성을 가질 수 없는 상황이 되었다. 분산전원이 포함된 배전계통에서는 전력조류가 일정한 방향을 가질 수 없으며, 부하와 분산전원의 발전 상태에 따라 변화하게 된다. 더욱이 이러한 복합배전계통의 효율적인 운용을 위해서는 더욱 정밀한 시스템 감시와 제어가 요구되게 되었다. Tap changing transformer나 voltage regulator 등을 이용한 전압조정 기능이나 분산전원을 이용한 무효전력 조정 기능 등이 계통의 운용에 적용되고, 배전자동화가 더욱 보편적으로 채택됨에 따라서 이러한 기능들을 보조하기 위한 소프트웨어 tool이 필요하게 된 것이다.

배전계통을 위한 조류계산에 대해서는 그동안 많은 연구 발표가 있었으며, 그 중요한 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다. Arrillaga와 Arnold는 3상 조류계산 문제에 대한 상세한 모델과 수식을 정리하였으며, Newton method에 근거한 고속분할 조류계산 기법을 사용하여 해를 구하는 방법을 소개하였다[6]. Chen 등은 모션 임피던스 행렬(Z_{bus})에 기초한 조류계산 기법을 개발하였으며, 이들은 발전기를 일정한 전력을 갖는 부하(constant PQ device)로 모델링하고 변전소 모션에서 일정한 전압을 유지하는 방법을 사용하였다[7]. Shirmohammadi 등은 [3]에서 제안하였던 보상기법을 3상 계통으로 확장하는 방법을 사용하였으나, 이 방법은 방사상 계통에서는 좋은 결과를 보이지만 계통 내에 망상 구조가 추가될수록 연산시간이 점점 느려지는 단점을 가지고 있다[8]. Newton method에 근거한 직각좌표계 선로조류 방정식을 정식화함으로써 3상 고조파 조류계산 문제의 해를 구하거나[9], 이 방법을 EMTP와 접목시켜서 3상 과도응답에 대한 시뮬레이션을 수행한 연구도 있었다[10]. 최근에는 3상 주입전류(current injections)를 이용한 방법이 제안되었고, 이 방법은 전압조정기가 없는 경우에 특히 좋은 수렴특성을 보이는 것으로 알려져 있다[11].

2.2 계통 모델링

2.2.1 부하 모델

각 모션에 접속된 부하는 단상, 2상 및 3상 부하가 있을 수 있으며, 부하의 형태에 따라 전력부하, 전류부하, 임피던스부하 등으로 구분할 수 있다. 전력부하는 각 모션에서 각 상별 주입전력의 형태로 표시되는 부하로 유

효율력 및 무효전력으로 구분하여 표시한다. 전류부하는 각 상별 전류의 크기와 역클로로 표시하며, 매 반복연산마다 새로 계산된 모션전압을 이용하여 동가 주입전력으로 변환한다. 임피던스부하는 Δ , Y 연결에 따라 그 계산 방법이 달라지는데 최종적으로 모두 3×3 어드미턴스 행렬로 모델링한다.

2.2.2 발전기(분산전원) 모델

배전계통 내에 연결되는 분산전원은 총 유효전력 출력이 일정한 전압원(voltage source)으로 모델링한다. 평형 여자전압을 갖는 3상 동기발전기 모델[6]을 사용하며, 그 구성은 그림 1과 같다. 그림 1은 3상 전원이 i 번 모션에 연결되어 있다고 가정한 것으로, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 평형 3상 전압원이 3상 동기 임피던스 행렬 Z_{sync} 를 통해 발전기 모션단자에 연결되는 모델을 사용한다.

발전기의 총 유효전력 출력은 식 (1)과 같이 계산되며, a, b, c 각 상의 단자 전압의 정상분은 식 (2)와 같이 된다. 발전기 내부 전압은 평형상태이므로, a 상의 전압 E_{ia} 만을 미지변수 벡터에 포함시켜 조류계산 연산을 수행한다.

$$P_i^{spec} = \text{Real}\{V_{abc} \cdot I_i^*\} \quad (1)$$

여기서, $V_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]$,

$$I_i = [I_{ia} \ I_{ib} \ I_{ic}]$$

$$V_i^+ = \frac{1}{3} (V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c) \quad (2)$$

여기서, $\alpha = e^{j2\pi/3}$.

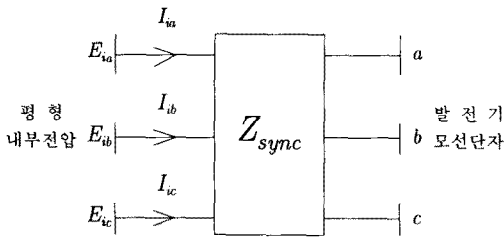


그림 1. 발전기(분산전원) 모델

2.2.3 변압기 모델

변압기 탭은 고정되어 있는 경우와 조정 가능한 탭을 모두 처리할 수 있도록 모델을 구성한다. 변압기는 급전선의 구성에 따라 각 상별로 단상 변압기를 연결하여 사용하거나 3상 변압기를 사용하게 된다. 어느 경우라도, 변압기들은 그 선형 영역에서 동작하는 것으로 가정하고 여자전류는 무시함으로써 모션 어드미턴스 행렬로 모델링한다[6, 12]. 어떤 두 모션 간에 변압기가 연결되어 있고 그 변압기의 어드미턴스 행렬을 Y_t 로 나타낼 수 있다면, 두 모션에 대한 모션 어드미턴스 행렬은 다음 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$Y = \begin{pmatrix} A^{-1}Y_tA^{-1} & -A^{-1}Y_t \\ -Y_tA^{-1} & Y_t \end{pmatrix} \quad (3)$$

이때, 행렬 A 는 대각 원소의 값이 각 상의 탭 값이 되는 3×3 대각행렬이다.

변압기 어드미턴스 행렬 Y_t 는 3상 변압기의 연결구조

에 따라 달라지며, 그 내용은 참고문헌 [6]에 상세히 기술되어 있다. 이러한 모델은 고정 탭을 갖는 변압기는 물론 탭을 조정할 수 있는 voltage regulator에도 그대로 적용할 수 있다.

2.3 사례 연구

본 논문에서는 뉴턴-랩슨 반복연산법을 이용하여 3상 조류계산 연산을 수행하였다. 그림 1의 발전기 모델을 사용하면 각 발전기 단자 모션은 발전기 내부모션(internal bus)에 연결되며, 따라서 발전기 단자 모션은 주입전력이 0인 PQ모션이 된다. 반면, 발전기 내부모션은 평형 상태를 유지하도록 제한되므로 a 상의 전압만을 미지변수로 계산하게 된다.

이러한 방법을 사용하면 PQ 모션에 대하여 $3N(N: 모션 수)$ 개의 전압값과 발전기의 수만큼에 해당하는 내부 모션 전압을 구하게 된다. 이를 위한 조류계산 방정식은 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\Delta P_i = P_i^s - P_i^c(V, \theta) = 0 \quad (4)$$

$$\Delta P_g = P_g^s - P_g^c(V, \theta) = 0 \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^s - Q_i^c(V, \theta) = 0 \quad (6)$$

$$\Delta V_g = V_g^+ - f(V, \theta) = 0 \quad (7)$$

여기서, P, Q, V 는 각각 유효전력, 무효전력, 전압의 크기를 나타내며, 아래 첨자 l 과 g 는 각각 부하(load)와 발전(generation)을 의미하고, 위 첨자 $s, c, +$ 는 각각 지정값(specified), 계산값(calculated), 정상분(positive sequence)을 의미한다.

다음의 그림 2와 같은 20모션 방사상 계통을 시험계통으로 구성하여 조류계산 프로그램을 시험하였다. 이 계통은 20개의 모션과 17개의 선로, 두 개의 voltage regulator로 구성되어있고, 계통 내의 다양한 위치에 분산전원을 투입하여 조류계산 프로그램의 수렴성을 검사하였다. 그림 2는 5번 모션에 3상 분산전원을 투입한 경우를 보여주고 있다.

계산에 사용된 계통은 실제계통은 아니며, 계통 내에 4개의 단상 선로와 2개의 2상 선로를 구성하고 3상 불평형 부하를 포함시키는 등 불평형 상태의 계통을 인위적으로 구성한 후 프로그램의 수렴특성을 확인하였다. 또한 조류계산 프로그램의 강인성을 확인하기 위하여 상당한 중부하 상태로 계통을 구성하였다.

그림 2와 같이 구성된 계통에 대한 조류계산 결과는 표 1과 같으며, 그 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 실제 계통의 운용 상황에서는 보기 어려운 상당한 위상변화 및 전압강하에도 불구하고 훌륭한 수렴특성을 보이는 것으로 확인되었다. 조류계산 프로그램은 단상선로 및 2상 선로가 포함되어 있거나 불평형 부하가 포함되어 있는 것에 관계없이 거의 일정한 수렴속도와 반복연산 수를 보이는 것으로 나타났다.

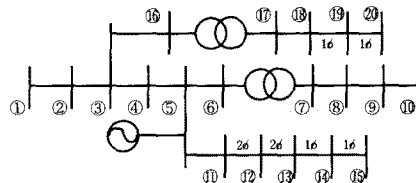


그림 2. 20모션 시험 배전계통

표 1. 20모선 시험계통에 대한 조류계산 연산결과

모선	V_a	θ_a	V_b	θ_b	V_c	θ_c
1	1.050	0.00	1.050	-120.00	1.050	120.00
2	0.940	-14.24	0.930	-133.91	0.944	106.77
3	0.906	-29.05	0.883	-148.72	0.905	93.10
4	0.961	-38.59	0.940	-158.56	0.953	83.35
5	1.045	-45.87	1.028	-166.02	1.032	75.78
6	1.062	-48.26	1.030	-168.92	1.042	73.93
7	1.021	-48.62	1.028	-169.28	1.024	73.65
8	1.036	-50.34	1.035	-170.85	1.036	72.36
9	1.066	-52.03	1.057	-172.42	1.063	71.06
10	1.090	-53.00	1.073	-173.29	1.084	70.46
11	1.046	-48.98	1.007	-168.26	1.027	74.81
12	1.050	-51.31	0.988	-169.66		
13	1.052	-52.90	0.972	-170.35		
14	1.052	-53.61				
15	1.051	-53.94				
16	0.870	-30.58	0.834	-150.08	0.848	92.80
17	0.865	-30.91	0.827	-150.46	0.841	92.73
18	0.863	-32.20	0.813	-151.66	0.857	92.63
19	0.858	-33.03				
20	0.855	-33.40				

3. 결 론

본 논문에서는 분산전원을 포함하는 배전계통을 위한 조류계산 프로그램을 구성하고 사례연구를 통하여 그 수렴특성을 확인하였다. 개발된 프로그램은 불평형 선로와 불평형 부하를 포함하고, 매우 가혹하게 운전되고 있는 상황에서도 훌륭한 수렴특성을 나타내었다.

개발된 조류계산 프로그램은 다양한 크기 및 계통 구조를 갖는 시험계통 및 실제계통에 대하여 시험을 계속하는 한편, 그 연산의 효율성을 더욱 제고하여 향후 구축될 배전 SCADA 시스템과 함께 배전계통 운용의 신뢰성을 높이는데 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 최근의 기술발전 속도로 볼 때 멀지 않은 장래에 적은 비용으로 데이터의 측정 및 전송 시스템을 배전계통과 분산전원 내에 구축할 수 있을 것으로 예상되며, 본 논문에서 활용한 조류해석과 상태추정 기능 등을 활용하여 구조개편과 관련된 계통 운용 및 요금 정산 등에 사용할 수도 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(관리번호: 01-jung-04) 주관으로 수행된 과제임.

- [1] W. Tinney and C. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, pp. 1449-1460, Nov. 1967.
- [2] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 859-869, May/June 1969.
- [3] D. Shirmohammadi, H. Hong, A. Semlyen, and G. Luo, "A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, pp. 753-762, May 1988.
- [4] Fan Zhang, Carol S. Cheng, "A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997.
- [5] A. Exposito and E. Ramos, "Reliable Load Flow Technique for Radial Distribution Networks," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 1063-1069, Aug. 1999.
- [6] J. Arrillaga and C. Arnold, Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley & Sons, 2001.
- [7] T-H. Chen, M-S. Chen, K-J Hwang, P. Kotas and E. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp. 1146-1152, July 1991.
- [8] Carol S. Cheng, Dariush Shirmohammadi, "A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995.
- [9] W. Xu, J. Marti and H. Dommel, "Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 174-182, Feb. 1991.
- [10] J. Allemong, R. Bennon and P. Selent, " Multiphase Power Flow Solutions Using EMTP and Newton's Method," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 1455-1462, Nov. 1993.
- [11] P. Garcia, J. Pereira, S. Carneiro, V. Costa, and N. Martins, "Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000.
- [12] V. Brandwajn, H. Dommel and I. Dommel, "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Steady State and Transient Studies," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, pp. 1369-1378, 1982.