

객체지향기법을 이용한 배전계통 조류계산

(Power-Flow by using OOP in Distribution Power System)

서규석* · 주재현

(Gyu-Seok Seo · Jae-Hyun Ju)

Abstract

This paper mainly proposes power flow algorithm using OOP(Object-Oriented Programming) in distribution power system. Because the most power system problems are calculated from power flow, it is an important part in power system. Recently, new power generation facilities are steadily installed in the distribution system connected with Microgrid which has been gaining popularity among the industry and utilities. This paper contributes to improve the power flow algorithm using OOP for efficient power flow according to the distribution system configuration fluctuated frequently.

Key Words : Distribution Power System, Power Flow, Object Oriented Programming

1. 서 론

최근 정부의 저탄소 녹색성장 정책에 힘입어 전기 분야에서는 스마트 그리드와 관련한 많은 연구가 진행 중에 있다. 그 중에서도 마이크로 그리드 즉 자체적으로 발전이 가능한 소규모 전력 네트워크에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다.

이 소규모 전력 네트워크의 소스는 대부분 태양광, 풍력, 연료전지 등의 신재생 에너지로 이루어질 것이며 현재 이들을 연계시키기 위한 많은 기술적 연구가 진행 중에 있다.

환경적으로 기존의 발전소 대비 소용량에 해당하는

신재생 에너지원은 대부분 배전 계통에 연계가 될 것이고, 이로 인해 보다 빈도 높은 배전계통 구성의 변화가 일어날 것이다.

전력 계통 운용 계획은 전적으로 시뮬레이션 결과에 의존을 하고 있다. 그 이유는 대상이 되는 시스템의 크기가 매우 크고 외란을 실 시스템에 가하기 어렵기 때문이다. 이러한 실정에 신재생에너지원 등의 새로운 설비가 추가됨으로 발생하는 전력 계통의 구조적 변화는 소프트웨어 유지·보수 측면에 상당한 어려움을 가중시키게 된다.

상기의 이유로 최근 개발되어 상용화된 대다수의 전력계통 해석 툴들은 객체지향기법을 기반으로 하고 있다. 과거의 프로그램 방식은 각 함수의 순서대로 하나씩 수행되는 일련의 프로시저들로 구성되어 있는 반면 객체지향기법은 데이터와 그 데이터를 대상으로 동작하는 프로시저를 단일 객체로 취급할 수 있는 장점이 있다. 전력계통은 수많은 설비들이 유기적으로

* 주저자 : 거제대학 선박전기과 교수
Tel : 055-680-1558, Fax : 055-680-1558
E-mail : gsseo@koje.ac.kr
접수일자 : 2010년 2월 22일
1차심사 : 2010년 2월 23일, 2차심사 : 2010년 3월 19일
심사완료 : 2010년 4월 2일

결합되어 있는 시스템이다. 각 설비를 객체 단위로 설계함으로써 향후 지속적인 유지·보수에 대해 사용자가 쉽게 대응할 수 있다.

이러한 상황을 개선하기 위해 전력계통 분야에서는 90년대 초반부터 소프트웨어 분야에 객체지향기법을 적용하려는 노력을 기울였으며 전력 조류 계산 측면에서도 상당한 발전을 해 왔다[1-3].

2. 배전계통의 설계

그림 1은 객체를 이용한 배전계통의 개념도이다.

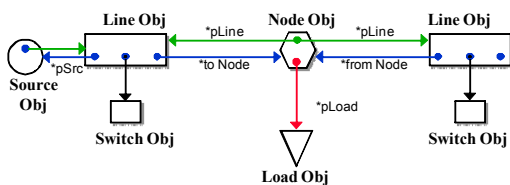


그림 1. 배전계통의 개념도
Fig. 1. Object Diagram for Distribution System

객체를 이용하여 배전계통을 간략히 나타내면 그림 1과 같고 선로(Line) 객체와 노드(Node) 객체가 상호 결속되어 있다. 또한 노드에 부하(Load) 객체가 연결되어 있는 형태를 보이고 있으며 선로 객체는 개폐기(Switch) 객체와 연결되어 있다. 구조적으로는 네트워크 형태를 이루지만 실제 운전은 방사형으로 하는 배전계통의 특성에 따라 개폐기를 적용하여 연결되어 있는 선로를 차단할 경우 사용된다.

그림 1을 구성하는 각 객체를 이해하기 위하여 먼저 전원부의 구조를 살펴보면 표 1과 같다.

표 1. 전원 클래스
Table 1. Source Class

```
class CObjSource : public CObj
{public:
    CObjList m_lines; //연결된 배전선로 };
```

전원부는 변전소의 변압기를 모델링한 것으로 하위의 배전선로를 통해 일반 수용가로 전력을 공급하는

지점이 되며 전원부의 상위 즉 송전계통은 고려하지 않도록 한다. 즉 전원부의 전압은 고정된 값으로 한다.

표 2. 노드 클래스
Table 2. Node Class

```
class CObjNode : public CObj
{public:
    CObjList m_lines; // 연결된 선로
    CObjDLine *m_pSrc; // 전원공급 선로
    CObjLoad *m_pLoad; // 연결된 부하 };
```

표 2는 노드 클래스의 구조이다. 노드는 배전선로 상호간의 접속점을 의미하며 실제적으로는 선로의 분기가 발생하는 지점이다. 또한 분포형 부하가 아닌 노드에 밀집된 형태의 부하가 연결될 수 있으며 전원 공급 선로가 연계될 수 있는 구조로 설계되어 있다.

표 3. 배전선로 클래스
Table 3. DLine Class

```
class CObjDLine : public CObj
{public:
    CObj* m_pFrom; // 시작점(전원, 노드)
    CObj* m_pTo; // 끝점(전원, 노드)
    CObj* m_pSrc; // 전원공급 노드
    CObjSwitch* m_pSwitch; // 스위치 속성};
```

표 3은 배전선로 클래스의 구조이다. 일반적으로 피더(feeder)나 배전선로는 수용가에게 전력을 전달하는 전선로를 의미한다. 변전소로부터 인출되는 피더나 지선(branch)을 통틀어 배전선로 객체로 표현한다. 배전선로는 구조적으로 양단에 노드와 연결되거나 또는 한 쪽에 전원을 갖게 된다. 따라서 표 3의 클래스 구조를 살펴보면 양단에 노드와 연결될 경우 m_pFrom, m_pTo의 데이터 멤버를 이용하여 양단 노드 시작점과 끝점을 선택하여 연결할 수 있다. 또는 한쪽이 소스와 연결될 경우에는 m_pSrc란 데이터 멤버를 이용하여 전원 객체와 연결할 수 있는 구조로 설계되어 있다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 존재는 하지만 운전되지 않는 배전선로를 표현하기 위해 각 배전선로 객

체는 스위치를 갖게 된다. 그 멤버로써 m_pSwitch를 갖게 되며, 결국 m_pFrom, m_pTo, m_pSrc, m_pSwitch의 연결 경로를 통해 토폴로지(topology)가 정의된다.

표 4. 부하 클래스
Table 4. Load Class

```
class CObjLoad : public CObj
{public:
    CObjNode* m_pNode; // 연결된 노드
    double m_PI; // 유효전력량(kW)
    double m_QI; // 무효전력량(kVar) };
```

표 4는 부하 클래스의 구조이며 부하량을 유효·무효 전력량으로 구분하여 정의하였다.

표 5. 스위치 클래스
Table 5. Switch Class

```
class CObjSwitch : public CObj
{public:
    CObjDLine* m_pLine; };
```

표 5는 스위치 클래스의 구조이다. 스위치는 배전선에 연결된 구분 개폐지 또는 연계 개폐기를 나타내며 값(On/Off)에 따라 운전상태가 결정된다.

지금까지 설명된 클래스로부터 파생되어진 객체의 상호 연결성을 이용하여 그림 1의 개념도와 같은 배전계통을 구성할 수 있으며 대형 배전계통의 경우에도 손쉽게 구현이 가능하다.

3. 배전계통 조류계산

3.1 기존의 방법

전력계통의 모든 문제는 조류계산에서부터 시작이 되는 만큼 매우 중요하고 비중이 크다[4-5]. 따라서 정확하고 빠른 시간 내에 그 해를 구할 수 있어야 한다.

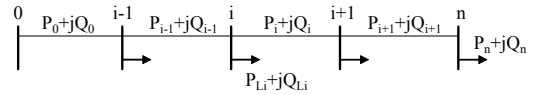


그림 2. 방사형 배전계통
Fig. 2. Radial Distribution System

그림 2는 지선이 존재하지 않는 간략한 방사형 배전계통이며 이때의 조류는 식 (3.1)~(3.3)으로 계산한다.

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \quad (3.1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \quad (3.2)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (3.3)$$

여기서, 노드 i와 i+1사이의 선로 임피던스는 $z_i = r_i + jx_i$ 로 표현이 된다. 그리고 P_i, Q_i 는 각각 노드 i에서 유출되는 유효, 무효전력을 의미하며, P_{Li}, Q_{Li} 는 노드 i에서 소비하는 유효, 무효전력을 의미한다. V_i 는 노드 i에서 전압의 크기를 나타내고 있다.

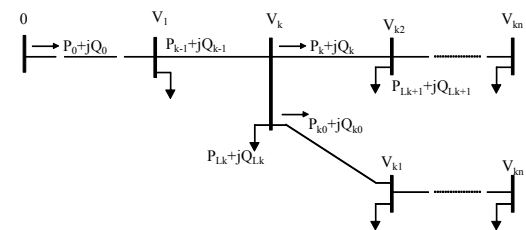


그림 3. 지선이 존재하는 배전계통
Fig. 3. Radial network which has branches

지선이 존재하고 그 분기하는 노드를 k라고 할 때 k번째 지선은 하나의 간선으로 고려하고 $X_k = [P_k, Q_k, |V_k^2|]$ 이라할 때 식 (3.4)~(3.6)으로 표현할 수 있다.

$$P_k = \hat{P}_k(X_{k-1}) - P_{k0} \quad (3.4)$$

$$Q_k = \hat{Q}_k(X_{k-1}) - Q_{k0} \quad (3.5)$$

$$|V_k| = \hat{V}(X_{k-1}) \quad (3.6)$$

여기서 $\hat{P}_k(X_{k-1})$, $\hat{Q}_k(X_{k-1})$, $\hat{V}(X_{k-1})$ 는 k번째 노드로 유입되는 P, Q, V이고 식 (3.4)~(3.6)은 아래의 경계 조건을 만족하면 된다.

1. 변전소의 전압의 크기는 주어진다.
2. 메인 간선의 종단에서 $P_n = \hat{P}_k(X_{k-1}) = 0$, $Q_n = \hat{Q}_k(X_{k-1}) = 0$ 이다
3. 지선 k 끝에서 $P_{kn} = 0$, $Q_{kn} = 0$ 이다.

여기서 배전계통에 대해 변전소의 전압의 크기가 주어졌기 때문에 P_0, Q_0, P_{k0}, Q_{k0} 를 알면 나머지 값들을 알 수 있다.

3.2 수렴특성을 개선한 조류계산

본 논문에서는 수렴 특성을 개선할 수 있도록 알고리즘을 수정한다. 최초의 공급전력은 하위 노드의 모든 부하량 합으로 주입한다. 하지만 종단 노드에서는 전력 편차가 발생하는데 이는 선로에서 발생하는 손실 때문이다. 이 편차를 보상해서 다시 반복 수행함으로써 전력의 편차를 줄이는데 이 편차가 사용자가 정의한 오차범위 내로 들어오면 수렴한 것으로 정의한다.

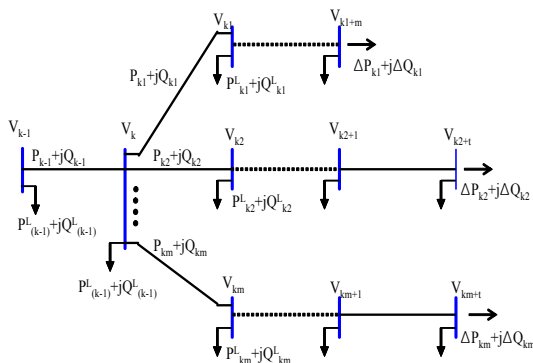


그림 4. 종단노드에서의 전력 편차
Fig. 4. Power mismatch on end nodes

그림 4는 분기가 존재하는 배전계통이다. 노드 (k-1)의 상태에서 식 (3.1)~(3.3)을 사용하여 노드 k의 전압과 유효전력, 무효전력을 구할 수 있다. 그러나 노드 k에서는 여러 지선이 존재하므로 분기량을 알아야만 하위 노드의 전압 및 각 선로의 조류를 구할 수 있다. 분기하는 노드를 (k)라고 하면 노드(k)에서의 경계조건은 식 (3.7)을 만족해야 한다.

$$P_k + jQ_k = \sum_1^m (P_{ki}) + j \sum_1^m (Q_{ki}) \quad (3.7)$$

P_{ki} : 분기점에서 i번째 분기선로로 공급되는 유효 전력량

Q_{ki} : 분기점에서 i번째 분기선로로 공급되는 무효 전력량

노드(k-1)에서 공급되는 전력은 조류계산식에 의해서 구할 수 있다. 즉 노드(k)의 전압, 노드(k)에서 유출되는 전력이 계산되어진다.

이 후 i번째 분기 선로로 분기되는 전력량은 식 (3.8)~(3.9)에 의해서 구할 수 있다.

$$P_{ki} = \alpha_{ip} P_{ki}^L + \beta_{ip} \Delta P_{ki} \quad (3.8)$$

$$Q_{ki} = \alpha_{iq} Q_{ki}^L + \beta_{iq} \Delta Q_{ki} \quad (3.9)$$

여기서,

$$\alpha_{ip} = P_{ki}^L / \sum_m P_{km}^L$$

$$\alpha_{iq} = Q_{ki}^L / \sum_m Q_{km}^L$$

$$\beta_{ip} = \Delta P_{ki} / \sum_m \Delta P_{km}$$

$$\beta_{iq} = \Delta Q_{ki} / \sum_m \Delta Q_{km}$$

P_{ki}^L : i번째 분기 하위노드에서 부하의 유효전력 총합

Q_{ki}^L : i번째 분기 하위노드에서 부하의 무효전력 총합

ΔP_{ki} : i번째 분기 종단노드에서의 유효전력 편차

ΔQ_{ki} : i번째 분기 종단노드에서의 무효전력 편차

분기가 존재하지 않은 경우에는 α, β 를 각각 1로 두고 계산한다.

4. 계통 모의

표 6은 그림 5에 주어진 시스템에 대해 전력조류를 수행하였을 경우 제안한 알고리즘과 기존의 방법을 비교한 것이다[5].

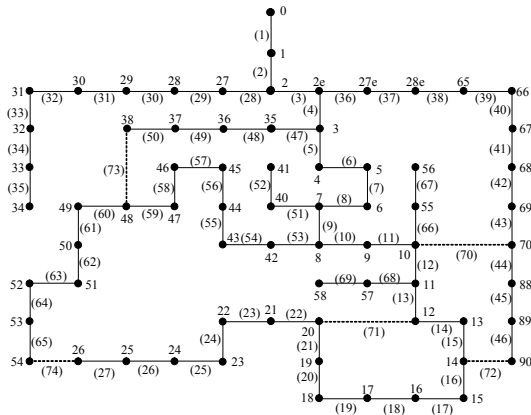


그림 5. 69모선 배전계통 모델
Fig. 5. 69-buses Distribution Power System

표 6. 전력조류계산의 수렴과정
Table 6. Process of convergence

iteration	제안한 방법	기존의 방법
1	150.8711	209.1041
2	17.8991	31.6408
3	2.3832	5.2891
4	0.3261	0.9014
5	0.0449	0.1543
6	0.0062	0.0264
7	0.0009	0.0043
8	0.0001	0.0008
9	0.0000	0.0001

표 6의 결과를 살펴보면 제안한 방법이 기존의 방법보다 수렴성 측면에서 우수함을 알 수 있다. 결과를 분석해 보면 반복 횟수 3회에서 총 부하에 대한 전력 편차의 오차가 0.1[%] 이내로 들어가며, 수렴 특성도

기존의 방법과 비교해서 다소 개선됨을 알 수 있었다. 표 7은 제안한 방법에 의해 계산된 배전계통의 모션 전압 결과이다.

표 7. 조류계산 결과
Table 7. Result of Power Flow

노드번호	전 압	노드번호	전 압
1	0.99997	33	0.99901
102	0.99993	34	0.99895
2	0.99993	35	0.99979
3	0.99984	36	0.99854
4	0.99902	37	0.99470
5	0.99009	38	0.99415
6	0.98079	40	0.97854
7	0.97858	41	0.97853
8	0.97744	42	0.97466
9	0.97244	43	0.97141
10	0.97134	44	0.96694
11	0.96818	45	0.96257
12	0.96525	46	0.94010
13	0.96235	47	0.92904
14	0.95948	48	0.92476
15	0.95895	49	0.91973
16	0.95807	50	0.91234
17	0.95806	51	0.91205
18	0.95760	52	0.91177
19	0.95730	53	0.90976
20	0.95681	54	0.90919
21	0.95681	55	0.97128
22	0.95674	56	0.97128
23	0.95658	57	0.96785
24	0.95641	58	0.96785
25	0.95634	65	0.99959
26	0.95632	66	0.99954
127	0.99992	67	0.99954
27	0.99993	68	0.99884
128	0.99975	69	0.99855
28	0.99985	70	0.99851
29	0.99973	88	0.99851
30	0.99971	89	0.99841
31	0.99961	90	0.99841
32	0.99935		

5. 결 론

본 논문에서는 객체지향기법을 이용한 배전계통 조류계산에 대한 문제를 다루었다. 구성된 배전계통 조류계산 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 모의계통에 적용하여 우수성을 입증하였으며, 객체지향기법 개념을 적용하여 향후 프로그램의 확장과 변경이 용이하도록 구성하였다.

References

- [1] S. Liu, S. M. Shahidepour, "An Object-Oriented Power System Graphics Package for Personal Computer Environment", IEEE Summer Power meeting, Seattle, WA, July 1992.
- [2] M. Foley, A. Bose, W. Mitchell and A. Faustini, "An Object Based Graphical User Interface for Power Systems", IEEE Transactions on Power System, Vol. 8, No. 1, Feb. 1993, pp. 97-104.
- [3] M. Foley, A. Bose, "Object-Oriented On-Line Network Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, Feb 1995, pp. 125-131.
- [4] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1401-1407.
- [5] Young-Jae Heon, Seung-Kyo Choi, Jae-Chul Kim, "Implementation of Simulated Annealing for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", Trans. KIEE, vol. 48A, no.4, pp. 371-378, April, 1999.

◇ 저자소개 ◇



서규석(徐圭錫)

1975년 11월 4일생. 2003년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 거제대학 선박전기과 전임강사.



주재현(朱宰賢)

1968년 5월 28일생. 1992년 영남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 거제대학 선박전기과 부교수.