

전력계통의 안전도를 고려한 경제급전에 관한 연구

(A Study on the Security-Constrained Economic Dispatch for Power System)

김경철* · 최홍규 · 원진희

(Kyung-Chul Kim · Hong-Kyu Choi · Jin-Hee Won)

요 약

경제급전은 전력회사간에 생산된 전력을 사고 파는 경우에 필연적으로 고려해야 한다. 본 논문은 전력계통 안전도, 최적조류계산과 안전도를 고려한 경제급전을 설명하고, 상용화된 EDSA의 active optimal power flow 프로그램을 이용한 사례연구를 통하여 최적의 경제급전이 되었음을 검증하였다.

Abstract

The economic dispatch is one of the major concerns in case of buying and selling generated powers between electric power companies. This paper describes the power system security, the optimal power flow, and the security-constrained economic dispatch and shows the EDSA's active optimal power flow software package is well suited through a simple case study.

Key Words : Security, Economic Dispatch, Optimal Power Flow

1. 서 론

최근 한국전력이 독점하고 있던 전력산업이 국가 정책에 따라 6개의 발전회사와 전력거래소, 송배전회사로 분리 운영되고 있다. 전력공급의 신뢰도를 높이고 전력회사간의 효율적인 전력관리를 위해서는 안전도를 고려한 발전비용을 최소화시키는 경제 급전이 요구된다.

전력시스템의 안전도는 전력계통을 구성하는 설비

가 고장을 일으켜도 안전하게 운전되는지를 판단한다. 예를들면, 송전선로가 낙뢰로 인하여 제거되거나, 과부하로 인하여 제한송전이 이루어 질때도 안전하게 전력을 공급할 필요가 있다. 안전도를 유지하기 위해서는 부하분담을 해야 하는 경우도 발생한다. 안전도를 고려한 전력분배는 상용화된 조류계산법으로는 해결하기가 어렵기 때문에 최적조류계산을 하여야 한다. 최적조류계산에 의해 총발전량이 결정되면 발전비용을 최소화하는 경제급전을 하여 각 발전소의 발전량을 정하게 된다.

본 논문에서는 안전도, 최적조류계산, 경제급전의 개념을 설명하고, 사례연구로 IEEE 14모션 전력시스템을 구성하여 이 시스템에서 안전도를 고려한 발전비용의 최소화에 관해 연구하였다. 결과 시뮬레이션은

* 주저자 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@wow.hongik.ac.kr
접수일자 : 2001년 12월 6일
1차심사 : 2001년 12월 10일, 2차심사 : 2002년 1월 2일
심사완료 : 2002년 1월 9일

상용화된 Software package인 EDSA's active optimal power flow[1]를 사용하여 사례연구 시스템의 안전도를 고려한 경제급전을 하고자 한다.

2. 안전도를 고려한 경제급전

안전도를 고려한 경제급전을 하려면 전력계통의 안전도를 설명하고, 안전도를 해결하기 위한 최적조류계산법을 이해한 다음 부하전력을 가장 경제적으로 배분하는 경제 급전을 하여야 한다.

2.1 전력계통의 안전도

전력시스템의 안전도는 전력계통을 구성하고 있는 설비가 고장을 일으킬 때 시스템을 안전하게 운전하는지를 판단한다[2].

예를 들면, 송전선로가 낙뢰로 인하여 보호계전기가 차단시킨 경우를 들 수 있다. 이런 경우 발전기의 전력배분을 각 송전선로가 과부하가 걸리지 않도록 해야 한다.

전력계통의 사고는 미리 예측 할 수 없기 때문에 사고가 나더라도 송전선로에 과부하가 걸리지 않고, 또한 발전기로 경제급전을 해야 한다.

전력계통의 사고는 순식간에 일어날 수 있으므로 계통을 운영하는 엔지니어가 적절히 대처하기 무척 어렵다. 그렇기 때문에 현대의 급전 지령소는 평상시 이런 사고를 모의하고 대처하는 Software program이 있다. 이 프로그램은 전력계통을 모델링하고 사고시를 대비하여 송전선로가 과부하가 되거나 전압이 제한치를 벗어나면 경고정보를 하게 되어있다. 안전도를 고려한 발전분배는 안전도 지수에 맞게 운영과라미터를 조절하는 것이다. 안전도에 영향을 끼치는 요소는 계통을 신뢰성 있게 운전하고, 운전제한조건을 만족하고, 가장 저렴한 발전비용으로 운영하는 것들이 있다.

그러므로 안전도 분석은 급전지령소에서 신속하게 이루어져야 한다. 일반적으로 안전도를 고려한 전력계통분석은 전력계통 모델을 간소화시켜 신속히 처리한다.

송전선로 안전도는 선로의 수를 N이라 하면 N security 와 N-1 security로 구분한다. N security 는 모든 선로에 과부하가 발생하지 않은 상태를 나타낸다. N-1 security는 송전선로 중 어느 한 선로가 제

거 되었을 때 나머지 선로에 과부하가 일어나지 않은 상태로 전력계통의 신뢰도를 높이는 중요한 요소이다.

안전도를 유지하기 위해서는 부하분담(Load shedding)을 해야 하는 경우는 그 위치를 규명하고 분담 내역을 출력으로 표시한다.

2.2 최적조류계산 (The Optimal Power Flow)

일반적으로 상용화되고 있는 조류계산은 발전기의 전력을 정하여 주어진 부하 전력에 맞게 각 모선의 전압과 전력의 흐름을 결정하게 되어있다. 하지만 각 선로의 과부하 문제를 방지하기 위한 안전도를 고려 하려면 발전기의 전력을 정하지 않고 문제를 해결하는 최적조류계산(OPF)이 요구된다[1][3].

선로제한 같은 비선형 문제를 풀기 위한 방법으로 Linear programming method가 널리 활용되고 있다. 전력계통모델을 간소화시켜 각 발전기의 전력을 신속하게 구하기 위해 선로는 리액턴스만으로 나타내고 전력은 유효전력만 고려하기로 한다.

최적조류계산은 다음조건을 만족하는 결과이다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{j \in NC} C_j & (1) \\ \text{s.t. } & \sum_{i \in NG} \sum_{k \in NG_i} P_{ik} + \sum_{j \in NC} C_j = \sum_{j \in NC} L_j \\ & -F^{\max} \leq F(l) \leq F^{\max} \text{ for } l \in NL \\ & P_{ik}^{\min} \leq P_{ik} \leq P_{ik}^{\max} \end{aligned}$$

여기서, C_j = j 모선의 부하 분담

P_{ik} = I 발전모선에서 k 발전기의 유효전력

L_i = j 부하모선의 유효전력

$F(l)$ = l 선로의 트립시 선로 유효전력

F^{\max} = 선로 kW 정격

$P_{ik}^{\min}, P_{ik}^{\max}$ = i 발전모선에서 k 발전기의 유효전력 제한값

NC = 부하모선 수

NG = 발전모선 수

NG_i = i 모선의 발전기 수

NL = 선로 수

2.3 경제급전

경제급전은 총발전비용을 최소화 시키기 위한 각 발전기의 전력배분을 의미한다[2][4].

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{i \in \text{NG}} \sum_{k \in \text{NG}_i} b_{ik} P_{ik} + \sum_{j \in \text{NC}} C_j \quad (2) \\ & \text{s.t. } \sum_{i \in \text{NG}} \sum_{k \in \text{NG}_i} P_{ik} + \sum_{j \in \text{NC}} C_j = \sum_{j \in \text{NC}} L_j \\ & -F^{\max} \leq F(l) \leq F^{\max} \\ & P_{ik}^{\min} \leq P_{ik} \leq P_{ik}^{\max} \end{aligned}$$

여기서, b_{ik} = i 발전모선에서 k 발전기의 발전비용 계수(\$/kWh)

경제 급전은 그림 1에서와 같은 순서로 계산된다.

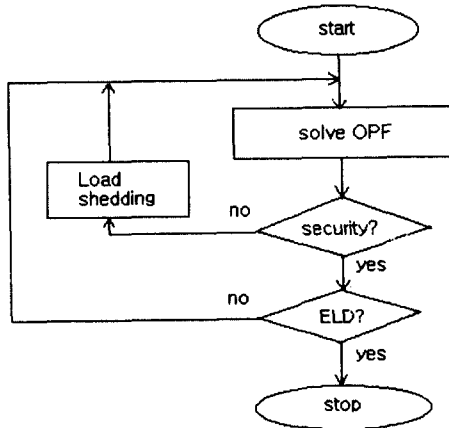


그림 1. 최적조류계산에 의한 안전도를 고려한 경제급전 흐름도

Fig. 1. Flow chart of the security-constrained economic dispatch by the optimal power flow

3. 사례연구

그림 2는 안전도를 고려한 경제급전을 위한 계통도이다. IEEE 14 모선 시스템은 IEEE에서 표준모델로 채택하여 조류계산, 고장계산, 안정도 해석 등에서 널리 활용하고 있다. EDSA의 OPF program을 사용하여 이 사례연구 시스템의 안전도를 고려한 경제급전을 하고자 활용하였다.

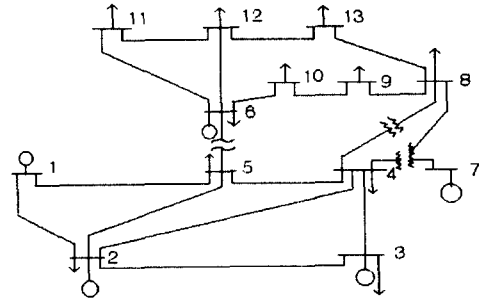


그림 2. IEEE 14 모선 시스템
Fig. 2. The IEEE 14-bus System

3.1 사례 1

사례 1에서는 각 발전기의 발전비용을 최소화하기 위해서, 모든 선로에 과부하가 걸리지 않도록 하고, 만일 과부하가 피할 수 없을 때는 최소 부하를 감하기로 하는 조건을 한 경우이다.

표 1은 사례 1 연구를 위한 모선 데이터이고, 표 2는 선로 데이터이고, 표 3은 발전기 데이터를 요약한 것이다.

표 1. 모선 입력 데이터
Table 1. Bus Input Data

| Bus No. | Number of Generator | Load (kW) | Voltage (V) |
|---------|---------------------|-----------|-------------|
| 01 | G 1 | 0.0 | 154000.0 |
| 02 | G 1 | 21700.0 | 154000.0 |
| 03 | G 1 | 94200.0 | 154000.0 |
| 04 | 0 | 47800.0 | 154000.0 |
| 05 | 0 | 7600.0 | 154000.0 |
| 06 | G 1 | 11200.0 | 22900.0 |
| 07 | G 1 | 0.0 | 154000.0 |
| 08 | 0 | 29500.0 | 22900.0 |
| 09 | 0 | 9000.0 | 22900.0 |
| 10 | 0 | 3500.0 | 22900.0 |
| 11 | 0 | 6100.0 | 22900.0 |
| 12 | 0 | 13500.0 | 22900.0 |
| 13 | 0 | 14900.0 | 22900.0 |
| Temp | 0 | 0.0 | 154000.0 |

표 2. 선로 입력 데이터
Table 2. Branch Input Data

| Branch No. | Security Code | initial Bus | Terminal Bus | Reactance (Ohm) | Rating (kW) |
|------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|
| 1 | 0 | 01 | 02 | 11.26833 | 200000.0 |
| 2 | 0 | 02 | 03 | 37.70141 | 150000.0 |
| 3 | 0 | 03 | 04 | 32.57095 | 50000.0 |
| 4 | 0 | 04 | 05 | 8.01943 | 100000.0 |
| 5 | 0 | 06 | 10 | 3.18240 | 50000.0 |
| 6 | 0 | 06 | 11 | 4.09296 | 50000.0 |
| 7 | 0 | 11 | 12 | 3.19808 | 50000.0 |
| 8 | 0 | 12 | 13 | 5.56832 | 50000.0 |
| 9 | 0 | 06 | 12 | 2.08432 | 50000.0 |
| 10 | 0 | 08 | 09 | 1.35200 | 50000.0 |
| 11 | 0 | 09 | 10 | 3.07312 | 50000.0 |
| 12 | 0 | 08 | 13 | 4.32640 | 50000.0 |
| 13 | 0 | 02 | 04 | 33.57838 | 100000.0 |
| 14 | 0 | 02 | 05 | 33.11371 | 50000.0 |
| 15 | 0 | 01 | 05 | 42.47574 | 150000.0 |
| 16 | T 0 | 05 | 06 | 47.99469 | 100000.0 |
| 17 | T 0 | 04 | 08 | 105.91892 | 100000.0 |
| 18 | W 0 | 04 | Temp | 39.82481 | 100000.0 |
| 19 | W 0 | 07 | Temp | 32.08533 | 100000.0 |
| 20 | W 0 | 08 | Temp | 20.03810 | 100000.0 |

표 3. 발전기 입력 데이터
Table 3. Generator Input Data

| Generator No. | Bus No. | Cost Coeff(\$/kWh) | Generation Lower (kW) | Limits Upper (kW) |
|---------------|---------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 01 | 0.01000 | 50000.0 | 200000.0 |
| 2 | 02 | 0.01800 | 20000.0 | 80000.0 |
| 3 | 03 | 0.01500 | 15000.0 | 50000.0 |
| 4 | 06 | 0.03800 | 10000.0 | 35000.0 |
| 5 | 07 | 0.03500 | 12000.0 | 40000.0 |

표 4. 모선 출력 결과
Table 4. Bus Output Results

| Bus No. | Generation (kW) | Load (kW) | Shedding (kW) |
|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 01 | G 200000.0 | 0.0 | 0.0 |
| 02 | G 200000.0 | 21700.0 | 0.0 |
| 03 | G 170000.0 | 94200.0 | 0.0 |
| 04 | 0.0 | 47800.0 | 0.0 |
| 05 | 0.0 | 7600.0 | 0.0 |

| Bus No. | Generation (kW) | Load (kW) | Shedding (kW) |
|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 06 | G 10000.0 | 11200.0 | 0.0 |
| 07 | G 12000.0 | 0.0 | 0.0 |
| 08 | 0.0 | 29500.0 | 0.0 |
| 09 | 0.0 | 9000.0 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 3500.0 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 6100.0 | 0.0 |
| 12 | 0.0 | 13500.0 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | 14900.0 | 0.0 |
| Temp | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total | 259000.0 | 259000.0 | 0.0 |

표 5. 발전기 출력 결과
Table 5. Generator Output Results

| Generator No. | Bus No. | Cost Coeff(\$/kWh) | Generation (kW) | Total Cost (\$/h) |
|-------------------------------|---------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 01 | 0.01000 | 200000.0 | 2000.0000 |
| 2 | 02 | 0.01800 | 20000.0 | 360.0000 |
| 3 | 03 | 0.01500 | 17000.0 | 254.9998 |
| 4 | 06 | 0.03800 | 10000.0 | 380.0000 |
| 5 | 07 | 0.03500 | 12000.0 | 420.0000 |
| Total Cost (\$/h) = 3414.9998 | | | | |

표 6. 선로 출력 결과
Table 6. Branch Output Results

| Branch No. | initial Bus | Terminal Bus | Active Power (kW) | Rating (kW) | Loading (%) |
|------------|-------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|
| 1 | 01 | 02 | 137770.5 | 200000.0 | 68.89 |
| 2 | 02 | 03 | 57557.6 | 150000.0 | 38.37 |
| 3 | 03 | 04 | -19642.4 | 50000.0 | 39.28 |
| 4 | 04 | 05 | -54796.1 | 100000.0 | 54.80 |
| 5 | 06 | 10 | 6720.6 | 50000.0 | 13.44 |
| 6 | 06 | 11 | 7606.3 | 50000.0 | 15.21 |
| 7 | 11 | 12 | 1506.3 | 50000.0 | 3.01 |
| 8 | 12 | 13 | 5253.8 | 50000.0 | 10.51 |
| 9 | 06 | 12 | 17247.5 | 50000.0 | 34.50 |
| 10 | 08 | 09 | 5779.4 | 50000.0 | 11.56 |
| 11 | 09 | 10 | -3220.6 | 50000.0 | 6.44 |
| 12 | 08 | 13 | 9646.2 | 50000.0 | 19.29 |
| 13 | 02 | 04 | 45571.9 | 100000.0 | 45.57 |
| 14 | 02 | 05 | 32941.0 | 50000.0 | 65.88 |
| 15 | 01 | 05 | 62229.5 | 150000.0 | 41.49 |
| 16 | T 05 | 06 | 32774.4 | 100000.0 | 32.77 |
| 17 | T 04 | 08 | 13339.7 | 100000.0 | 13.34 |

| Branch No. | initial Bus | Terminal Bus | Active Power (kW) | Rating (kW) | Loading (%) |
|------------|-------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|
| 17 | T 04 | 08 | 13339.7 | 100000.0 | 13.34 |
| 18 | W 04 | Temp | 19585.9 | 100000.0 | 19.59 |
| 19 | W 07 | Temp | 12000.0 | 100000.0 | 12.00 |
| 20 | W 08 | Temp | -31585.9 | 100000.0 | 31.59 |

사례 1에서 총 발전비용은 3415(\$/h)이고, 모든 선로에 과부하가 걸리지 않았다.

3.2 사례 2

사례 2는 사례 1의 입력 데이터를 똑같이 하고, 각 선로의 안전도를 그림 2. IEEE 14모선 시스템을 구성하고 있는 20개의 선로 중 임의의 한 선로가 제거될 경우를 고려한 것이다. 표 7, 8, 9는 모든 조건을 만족한 컴퓨터 출력으로 모선, 발전기, 선로데이터를 나타낸다.

표 7. 모선 출력 결과
Table 7. Bus Output Results

| Bus No. | Generation (kW) | Load (kW) | Shedding (kW) |
|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 01 | G 200000.0 | 0.0 | 0.0 |
| 02 | G 22502.6 | 21700.0 | 0.0 |
| 03 | G 50000.0 | 94200.0 | 0.0 |
| 04 | 0.0 | 47800.0 | 0.0 |
| 05 | 0.0 | 7600.0 | 0.0 |
| 06 | G 24497.3 | 11200.0 | 0.0 |
| 07 | G 12000.0 | 0.0 | 0.0 |
| 08 | 0.0 | 29500.0 | 0.0 |
| 09 | 0.0 | 9000.0 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 3500.0 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 6100.0 | 0.0 |
| 12 | 0.0 | 13500.0 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | 14900.0 | 0.0 |
| Temp | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total | 259000.0 | 259000.0 | 0.0 |

표 8. 발전기 출력 결과
Table 8. Generator Output Results

| Generator No. | Bus No. | Cost Coeff(\$/kWh) | Generation (kW) | Total Cost (\$/h) |
|-------------------------------|---------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 01 | 0.01000 | 150000.0 | 1500.0005 |
| 2 | 02 | 0.01800 | 22502.6 | 405.0472 |
| 3 | 03 | 0.01500 | 50000.0 | 750.0000 |
| 4 | 06 | 0.03800 | 24497.3 | 930.8979 |
| 5 | 07 | 0.03500 | 12000.0 | 420.0000 |
| Total Cost (\$/h) = 4005.9458 | | | | |

표 9. 모선 출력 결과
Table 9. Branch Output Results

| Branch No. | initial Bus | Terminal Bus | Active Power (kW) | Rating (kW) | Loading (%) |
|------------|-------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|
| 1 | 01 | 02 | 101904.6 | 200000.0 | 50.95 |
| 2 | 02 | 03 | 38336.1 | 150000.0 | 25.56 |
| 3 | 03 | 04 | -5863.9 | 50000.0 | 11.73 |
| 4 | 04 | 05 | -44857.6 | 100000.0 | 44.86 |
| 5 | 06 | 10 | 9356.1 | 50000.0 | 18.71 |
| 6 | 06 | 11 | 7933.4 | 50000.0 | 15.99 |
| 7 | 11 | 12 | 1893.4 | 50000.0 | 3.79 |
| 8 | 12 | 13 | 6994.9 | 50000.0 | 13.99 |
| 9 | 06 | 12 | 18601.6 | 50000.0 | 37.20 |
| 10 | 08 | 09 | 3143.9 | 50000.0 | 6.29 |
| 11 | 09 | 10 | -5856.1 | 50000.0 | 11.71 |
| 12 | 08 | 13 | 7905.1 | 50000.0 | 15.81 |
| 13 | 02 | 04 | 37355.3 | 100000.0 | 37.36 |
| 14 | 02 | 05 | 27015.9 | 50000.0 | 54.03 |
| 15 | 01 | 05 | 48095.5 | 150000.0 | 32.06 |
| 16 | T 05 | 06 | 22653.7 | 100000.0 | 22.65 |
| 17 | T 04 | 08 | 11759.3 | 100000.0 | 11.76 |
| 18 | W 04 | Temp | 16789.6 | 100000.0 | 16.79 |
| 19 | W 07 | Temp | 12000.0 | 100000.0 | 12.00 |
| 20 | W 08 | Temp | -28789.6 | 100000.0 | 28.79 |

총 발전비용은 사례 1의 경우는 3415(\$/h)인 반면에, 사례 2는 사례 1보다 나은 안전도를 고려하여 4006(\$/h)로 증가한 것을 알 수 있다.

3.3 사례 3

사례 3은 사례 1의 입력 데이터중에서 두 선로의 용량을 약 60% 감소시켜 그 결과를 검토한 경우이다. 선로번호 4를 용량 100(MW)에서 40(MW)로 하고, 선로번호 9를 용량 50(MW)에서 30(MW)로 변경했다.

표 10, 11, 12는 사례 3의 모든 조건을 만족한 컴퓨터 출력으로 모선, 발전기, 선로 데이터를 나타낸다.

표 10. 모선 출력 결과
Table 10. Bus Output Results

| Bus No. | Generation (kW) | Load (kW) | Shedding (kW) |
|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 01 | G 108715.2 | 0.0 | 0.0 |
| 02 | G 78284.8 | 21700.0 | 0.0 |
| 03 | G 50000.0 | 94200.0 | 0.0 |
| 04 | 0.0 | 47800.0 | 0.0 |
| 05 | 0.0 | 7600.0 | 0.0 |
| 06 | G 10000.0 | 11200.0 | 0.0 |
| 07 | G 12000.0 | 0.0 | 0.0 |
| 08 | 0.0 | 29500.0 | 0.0 |
| 09 | 0.0 | 9000.0 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 3500.0 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 6100.0 | 0.0 |
| 12 | 0.0 | 13500.0 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | 14900.0 | 0.0 |
| Temp | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total | 259000.0 | 259000.0 | 0.0 |

표 11. 발전기 출력 결과
Table 11. Generator Output Results

| Generator No. | Bus No. | Cost Coeff(\$/kWh) | Generation (kW) | Total Cost (\$/h) |
|-------------------------------|---------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 01 | 0.01000 | 108715.2 | 1087.1516 |
| 2 | 02 | 0.01800 | 78284.8 | 1409.1267 |
| 3 | 03 | 0.01500 | 50000.0 | 750.0000 |
| 4 | 06 | 0.03800 | 10000.0 | 380.0000 |
| 5 | 07 | 0.03500 | 12000.0 | 420.0000 |
| Total Cost (\$/h) = 4046.2783 | | | | |

표 12. 선로 출력 결과
Table 12. Branch Output Results

| Branch No. | initial Bus | Terminal Bus | Active Power (kW) | Rating (kW) | Loading (%) |
|------------|-------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|
| 1 | 01 | 02 | 64290.6 | 200000.0 | 32.15 |
| 2 | 02 | 03 | 41594.3 | 150000.0 | 27.73 |
| 3 | 03 | 04 | -2605.7 | 50000.0 | 5.21 |
| 4 | 04 | 05 | -40000.0 | 100000.0 | 100.00 |
| 5 | 06 | 10 | 6213.0 | 50000.0 | 12.43 |
| 6 | 06 | 11 | 7531.7 | 50000.0 | 15.06 |
| 7 | 11 | 12 | 1431.7 | 50000.0 | 2.86 |
| 8 | 12 | 13 | 4918.5 | 50000.0 | 9.84 |
| 9 | 06 | 12 | 16986.8 | 50000.0 | 56.62 |
| 10 | 08 | 09 | 6287.0 | 50000.0 | 12.57 |
| 11 | 09 | 10 | -2713.0 | 50000.0 | 5.43 |
| 12 | 08 | 13 | 9981.5 | 50000.0 | 19.96 |
| 13 | 02 | 04 | 44174.2 | 100000.0 | 44.17 |
| 14 | 02 | 05 | 35106.9 | 50000.0 | 70.21 |
| 15 | 01 | 05 | 44424.6 | 150000.0 | 29.62 |
| 16 | T 05 | 06 | 31931.5 | 100000.0 | 31.93 |
| 17 | T 04 | 08 | 13644.1 | 100000.0 | 13.64 |
| 18 | W 04 | Temp | 20124.5 | 100000.0 | 20.12 |
| 19 | W 07 | Temp | 12000.0 | 100000.0 | 12.00 |
| 20 | W 08 | Temp | -32124.5 | 100000.0 | 32.12 |

사례 3은 사례 1과 사례 2 보다 조건을 더 악화시켜 총 발전 비용은 4046(\$/h)으로 제일 많이 요구되었다.

3.4 사례 4

사례 4는 사례 3의 경우에서 선로의 안전도를 어느 한 선로가 제거될 경우를 고려한 것이다.

표 13, 14, 15는 모든 조건을 만족한 컴퓨터 출력으로 모선, 발전기, 선로 데이터를 나타낸다.

표 13. 모선 출력 결과
Table 13. Bus Output Results

| Bus No. | Generation (kW) | Load (kW) | Shedding (kW) |
|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 01 | G 32060.8 | 0.0 | 0.0 |
| 02 | G 37129.7 | 21700.0 | 0.0 |
| 03 | G 50000.0 | 94200.0 | 9809.5 |

| Bus No. | Generation (kW) | Load (kW) | Shedding (kW) |
|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 04 | 0.0 | 47800.0 | 0.0 |
| 05 | 0.0 | 7600.0 | 0.0 |
| 06 | G 10000.0 | 11200.0 | 0.0 |
| 07 | G 40000.0 | 0.0 | 0.0 |
| 08 | 0.0 | 29500.0 | 0.0 |
| 09 | 0.0 | 9000.0 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 3500.0 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 6100.0 | 0.0 |
| 12 | 0.0 | 13500.0 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | 14900.0 | 0.0 |
| Temp | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total | 169190.5 | 259000.0 | 9809.5 |

표 14. 발전기 출력 결과
Table 14. Generator Output Results

| Generator No. | Bus No. | Cost Coeff(\$/kWh) | Generation (kW) | Total Cost (\$/h) |
|-------------------------------|---------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 01 | 0.01000 | 32060.8 | 320.6081 |
| 2 | 02 | 0.01800 | 37129.7 | 668.3342 |
| 3 | 03 | 0.01500 | 50000.0 | 750.0000 |
| 4 | 06 | 0.03800 | 10000.0 | 380.0000 |
| 5 | 07 | 0.03500 | 40000.0 | 1400.0000 |
| Total Cost (\$/h) = 3518.9424 | | | | |

표 15. 선로 출력 결과
Table 15. Branch Output Results

| Branch No. | initial Bus | Terminal Bus | Active Power(kW) | Rating (kW) | Loading (%) |
|------------|-------------|--------------|------------------|-------------|-------------|
| 1 | 01 | 02 | 19654.6 | 200000.0 | 9.83 |
| 2 | 02 | 03 | 19147.0 | 150000.0 | 12.76 |
| 3 | 03 | 04 | -15243.5 | 50000.0 | 30.49 |
| 4 | 04 | 05 | 9990.7 | 100000.0 | 24.98 |
| 5 | 06 | 10 | 1450.3 | 50000.0 | 2.90 |
| 6 | 06 | 11 | 6832.2 | 50000.0 | 13.66 |
| 7 | 11 | 12 | 732.2 | 50000.0 | 1.46 |
| 8 | 12 | 13 | 1772.1 | 50000.0 | 3.54 |
| 9 | 06 | 12 | 14539.9 | 50000.0 | 48.47 |
| 10 | 08 | 09 | 11049.7 | 50000.0 | 22.10 |
| 11 | 09 | 10 | 2049.7 | 50000.0 | 4.10 |
| 12 | 08 | 13 | 13127.9 | 50000.0 | 26.26 |

| Branch No. | initial Bus | Terminal Bus | Active Power(kW) | Rating (kW) | Loading (%) |
|------------|-------------|--------------|------------------|-------------|-------------|
| 13 | 02 | 04 | 6711.8 | 100000.0 | 6.71 |
| 14 | 02 | 05 | 9225.5 | 50000.0 | 18.45 |
| 15 | 01 | 05 | 12406.2 | 150000.0 | 8.27 |
| 16 | T 05 | 06 | 24022.5 | 100000.0 | 24.02 |
| 17 | T 04 | 08 | 9773.7 | 100000.0 | 9.77 |
| 18 | W 04 | Temp | 3903.8 | 100000.0 | 3.90 |
| 19 | W 07 | Temp | 40000.0 | 100000.0 | 40.00 |
| 20 | W 08 | Temp | -43903.8 | 100000.0 | 43.90 |

사례 4의 조건을 만족하기 위해서는 필연적으로 부하감축이 요구된다. 부하 모션 3의 용량이 94.2(MW)에서 9.8(MW)을 감축해야 하는 것을 알 수 있다. 부하가 감소한 만큼 총 발전 비용이 사례 3의 4046(\$/h)에서 3519(\$/h)으로 감소했지만, 경제급전으로 인한 것이 아니고 부하 감축으로 인한 결과이다.

4. 결 론

한국전력산업이 6개의 발전회사와 전력 거래소, 송배전 회사로 분리 운영되므로 인해서 전력을 생산하고 운용하는데 효율적인 관리가 요구된다. 본 논문에서는 전력 계통을 안전하게 운전하면서 발전비용을 최소화시키는 경제급전에 대해 알아보았다. 전력 계통의 사고는 예측하기 어렵기 때문에 안전도를 고려한 전력 분배는 매우 신속히 이루어져야 한다. 송전선로의 송전용량 제한과 더불어 안전도 제한조건을 만족하는 최적조류계산의 유용성도 검토하였다.

사례 연구에서 전형적인 송전용량 제한을 두고 한 경제급전, 송전선로 사고를 대비한 경제급전, 송전용량 제한을 악화시킨 경우의 경제급전, 그리고 송전선로 사고를 대비하고 악화된 송전용량 제한을 고려한 경제급전을 컴퓨터로 시뮬레이션 하여 결과에 대한 분석을 하였다.

그러므로 사례연구를 통해서 알 수 있듯이 안전도를 고려한 경제 급전은 전력을 생산하고 관리 운용하는 모든 엔지니어들에게 컴퓨터 시뮬레이션으로 훈련해야 하는 중요한 도구로 활용될 것으로 사료된다.

References

- [1] User's Guide, "Active Optimal Power Flow", EDSA Micro Coporation, 1998.
- [2] A.J.Wood, B.F.Wollenberg, "Power Generation Operation And Control", John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [3] R.Y.Kwok, "Optimal Power Flow in Power System Analysis", The University of Texas at Arlington, Master Thesis, 1987.
- [4] R.R.Shoults, "Optimal System Operation", The University of Texas at Arlington, Lecture Notes, 1987.
- [5] 김광인, "현행 전력시장의 운영특성과 향후 과제", 전력학회지 제 50권 9호, 2001.
- [6] 문영환 외, "최적 조류계산 프로그램과 한전계통의 적용", 전력학회지 제 49권 3호, 2000.

◇ 저자소개 ◇

김 경 철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수.

최 홍 규 (崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 1975년 홍익대학교(공학사). 1977년 연세대학교(공학석사). 1992년 홍익대학교(공학박사). 현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수. 전기설비 연구소 소장.

원 진 희 (原鎭熙)

1959년 8월 29일생. 1985년 홍익대학교(공학사). 2000년 홍익대학교(공학석사). 현재 홍익대학교 전기공학과 대학원 박사과정. 전기설비기술사. 1998년 12월~현재 (주)다산전기기술사 사무소 대표이사.