

## 전력거래에서 최적조류계산을 수행하는 Web 프로그램 개발

정재옥 문준모 이광호  
단국대학교 전기공학과

### Development of Web Program for the Calculation of OPF and Congestion Cost

Jae-Ok Jung Jun-Mo Moon Kwang-Ho Lee  
Department of Electrical Engineering, Dankook University

**Abstract** - The electric utility industry around the world is undergoing a revolutionary transition from vertically integrated monopoly structure to a competitive industry. Electric market price changes hourly because suppliers and customers participate in a open market competitively.

In this paper a web program developed with function of OPF calculation. This program is re by a perl language. Also We calculated the marginal cost and the congestion charge shadow price resulted from the OPF.

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$$

여기서  $C_i$ 는 발전비용함수이며,  $P_{Gi}$ 는 발전력을  $P_{Dk}$ 는 부하를 나타낸다.  $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ 는 발전력의 하한과 상한 값을 나타낸다.  $P_i, P_i^{\max}$ 는  $i$  선로의 선로조류와 최대 허용용량이다. 만약 비용함수가 이차함수 형태로 주어지는 경우 SQP(Successive Quadratic Programming)기법 [3]으로 OPF가 용이하게 계산된다.

(1)식을 가지고 OPF를 수행하여 도출되는 잠재가격 정보를 이용하여 모션한계비용을 계산하는 식은 다음 식 (2)와 같다.[4]

$$MC_i = \lambda - \sum_{l=1}^{N_l} u_l \frac{\partial P_l}{\partial P_i} \quad (2)$$

#### 1. 서 론

현재 전 세계의 전력산업은 큰 변혁기에 직면하고 있다. 규모의 경제에 기초한 수직 통합 독점형 체제에서 기능분할에 기초한 시장경쟁 체제로 변화하고 있는 것이다.[1] 경쟁체제에서는 공급자와 소비자가 동등하게 시장에 참여하므로 전력가격은 시간대별로 시장원리에 의해 결정된다. 이러한 시간대별 가격을 인터넷 기반에서 온라인으로 처리하면 전략적인 측면에서 효과적이다.

인터넷을 이용하면 시간이나 공간의 제약 없이 원하는 정보를 거의 실시간으로 제공받을 수 있다. 인터넷 서비스 중 월드 와이드 웹(World Wide Web, Web)이라 불리는 서비스는 최근에 가장 주목받는 서비스로서 그 활동영역이 점점 넓어져 가고 있다.[2] 이런 이유로 웹 페이지는 사용자의 웹 브라우저에서만 이루어지는 단방향 통신이 아니라 서버와 사용자간의 양방향 통신을 할 수 있는 CGI(Common Gateway Interface)라는 하나의 규약이 생겨났다.

본 논문에서는 각 발전사업자들의 연속적인 연료비 합수를 인터넷을 통해 온라인으로 입력받아 최적조류계산(OPF: Optimal Power Flow)을 수행하는 프로그램을 개발했다. 이 프로그램은 Web 프로그램 언어 중 하나인 Perl을 외부 프로그램과 웹서버간에 서로 주고받을 수 있는 규약인 CGI에 적용시켜 구현했고 OPF의 결과로 도출되는 잠재가격 정보를 이용하여 모션한계비용과 혼잡비용을 계산하였다.

#### 2. 최적조류계산과 혼잡비용

비용최소화를 목적함수로 하고 선로의 손실을 무시할 경우 제약조건에는 다음 식(1)과 같이 계통의 수급조건과 선로에서의 최대 허용 용량, 그리고 각 발전기의 최소 및 최대 출력을 포함된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \\ & \text{subject to} \quad \sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{k=1}^m P_{Dk} = 0 \\ & \quad \quad \quad P_i \leq P_i^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 전력수급조건에 관련된 라그랑지안 승수이며,  $u_l$ 은  $l$ 선로의 선로조류 한계용량에 해당하는 라그랑지안 승수이다.

혼잡비용은 모션한계비용을 이용해서 두 가지 방법으로 구할 수 있다. 첫 번째는 수용가가 지불해야 할 비용과 발전소가 수령해야 하는 금액의 차이로 계산되고, 두 번째는 각 선로에 대해서 구하는 것으로 선로 양단 모션에서의 모션한계비용의 차이와 선로조류의 곱으로 계산된다.[5]

#### 3. 웹 프로그램과 Perl

##### 3.1 웹 프로그램

최근 인터넷이 널리 사용되고 웹사이트를 통해 수행되는 일들이 늘어나면서 정적인 HTML만으로는 부족함을 느끼게 되었고 그래서 탄생한 것이 바로 CGI다.[6] CGI는 동적으로 웹 페이지를 만들어주는 프로그램이라 할 수 있는데 다음 그림 1과 같이 웹 브라우저로부터 받은 사용자 입력을 바탕으로 웹 페이지를 동적으로 생성시킨다.

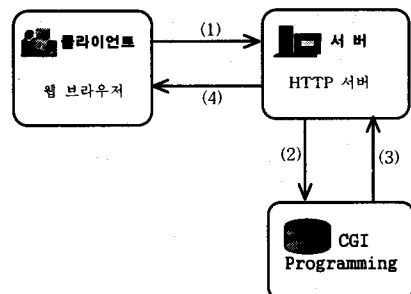


그림 1 CGI의 데이터 흐름도

그림 1에서의 데이터 흐름을 살펴보면 다음과 같다.

- (1): 클라이언트에서 서버로 TCP/IP를 통해 데이터 전송
- (2): 서버가 CGI 프로그램에게 실행을 하도록 요청
- (3): CGI 프로그램에서 서버로 출력
- (4): 적절한 MIME헤더를 갖고 서버가 클라이언트로 응답한 후, 연결이 해제된다.

이와 같이 웹 프로그래밍이란 바로 CGI프로그램의 개발을 의미하고, 이런 CGI프로그램은 웹서버에서 지정한 형식을 맞출 수만 있다면 C나 C++등 어떤 언어로든지 작성 할 수 있다.

### 3.2 Perl

Perl은 Larry Wall이 만든 Practical Extraction and Report Language라는 언어로 문서 형태의 데이터로부터 필요한 정보들을 추출, 그 정보를 바탕으로 새로운 문서를 구성하는데 적합한 언어이다.[7]

시스템 관리를 위하여 사용하기도 하며 무엇보다도 Web 서버의 CGI를 위한 언어로 각광 받고 있다.

## 4. 사례연구

### 4.1 초기 화면

본 논문에서 개발한 Web 기반 OPF 프로그램은 사용자의 편의를 위해서 데이터 입력에서부터 조류계산 수행, 선로의 한계용량 지정, OPF 수행, 혼잡비용계산의 순서로 수행된다. 사례연구의 대상 계통은 선로의 손실을 무시한 3기 5보선 계통으로 계통도 및 프로그램의 주 화면은 다음 그림 2와 같다.

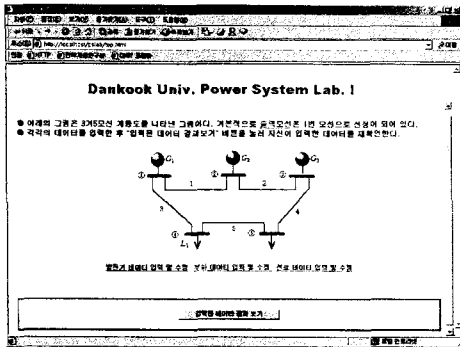


그림 2 프로그램의 Main 화면

### 4.2 데이터 입력

이 프로그램은 발전기 데이터와 선로 데이터, 그리고 부하 데이터를 각각 독립적으로 입력을 받는다. 데이터 입력 화면은 그림 2와 같다.

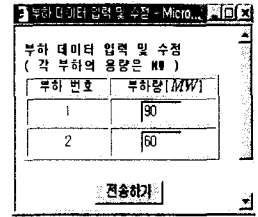
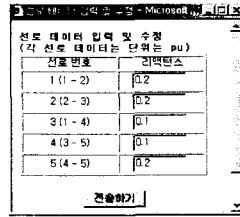
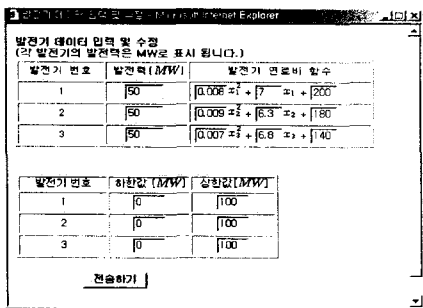


그림 2 데이터 입력 화면

그림 2에서와 같이 입력받은 각 데이터는 Web 상에서 복수의 사용자가 접속할 경우 자신이 입력한 데이터를 구분하기 위해서 IP Address를 이용하여 사용자별로 저장된다. 자신이 입력한 데이터 값을 서버로 전송시키고 난 후 그 값을 확인 할 수 있으며 만약 사용자가 입력한 데이터 값이 아닐 경우 자바 스크립트(Java Script)를 이용해서 수정이 가능하다.

### 4.3 조류계산 수행

그림 3은 입력받은 각각의 데이터 값을 가지고 선로계약 없이 DC 조류계산을 수행하는 화면이다. 조류계산에 사용하는 데이터는 이 화면에 접속하고 있는 사용자의 IP Address를 식별하여 입력 데이터를 불러오기 때문에 사용자가 입력했던 데이터로 조류계산을 수행 할 수 있다.

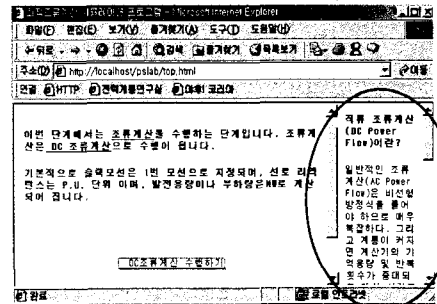


그림 3 조류계산을 수행하는 화면

또한 오른쪽 프레임 공간을 이용하여 해당화면의 핵심이 되는 용어는 하이퍼링크 기술로 자세한 설명을 해 놓았다.

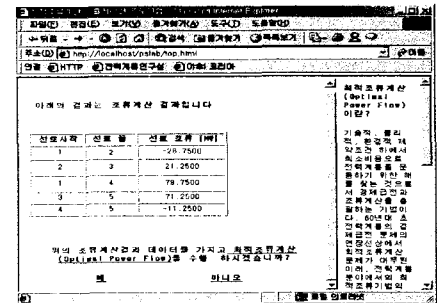


그림 4 조류계산 결과화면

그림 4는 조류계산을 수행하고 난 뒤 그 결과 값을 보여준다. 결과 값은 각 선로의 선로조류를 보여주고, 최적조류계산 수행의 가부를 묻는다.

### 4.4 최적조류계산 수행

최적조류계산 수행에 앞서 각 선로의 한계용량을 지정할 수 있는데 본 사례연구에서는 3-5번 선로에 혼잡이 발생했을 경우를 고려했다. 3-5번 선로의 선로조류는 그림 4에서 알 수 있듯이 71.25MW지만 한계용량을 60MW로 지정했기 때문에 3-5선로가 혼잡이 발생했음을 알 수 있다.

선로번호	선로종류	선로 한계용량(MW)
1	2	-20.7500
2	3	21.2500
1	4	70.7500
3	5	71.2500
4	5	-11.2500

선로종류	선로번호	선로 한계용량(MW)
1	2	1750
2	3	1750
1	4	1750
3	5	60
4	5	1750

그림 5 선로의 한계용량을 지정하는 화면

그림 5에서와 같이 3-5번 선로에 혼잡이 일어났을 경우 최적조류계산을 수행한 결과 각 선로의 선로조류와 발전력은 그림 6과 같다.

선로번호	선로종류	선로 조류(MW)
1	2	-20.7047
2	3	41.7047
1	4	80.0000
3	5	80.0000
4	5	0.0000

발전소	출력	발전비
1	63.2353	
2	68.5294	
3	18.2353	

그림 6 최적조류계산 수행 결과

그림 6에서는 혼잡이 일어났던 선로, 즉 3-5번 선로의 혼잡이 해결된 것을 확인할 수 있다. 이렇게 선로조류 제약조건을 만족시키기 위해서 재경제급전(Redispatch) 과정을 거치게 되며, 재경제급전에 의해 추가로 소요되는 비용은 각 모선별로 다른 것이 보통이므로 이를 모션 한계비용(Nodal Marginal Cost)이라 한다. 혼잡비용(Congestion Cost)은 모션한계비용을 이용하여 계산될 수 있다.

#### 4.5 혼잡비용계산

최적조류계산 결과로 도출되는 잠재가격 정보를 이용하여 모션한계비용과 혼잡비용을 계산하는 단계이다.

각 모선의 한계비용은 식(2)에서와 같이 혼잡비용이 계통한계비용( $\lambda$ )에 추가되어 나타나고 모션에서의 혼잡비용은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} & \text{수용가가 지불해야할 비용} \\ & = (8.9682 \times 90) + (9.4465 \times 60) = 1373.9 \\ & \text{발전소가 수행해야 하는 금액} \\ & = (8.7291 \times 63.2353) + (8.5209 \times 68.5294) + (7.7726 \times 18.2353) \\ & = 1259.2 \end{aligned}$$

모션에서의 총 혼잡비용은  $114.7 = (1373.9 - 1259.2)$ 이다.

그림 7은 각 모선의 한계비용과 혼잡비용을 계산한 결과이다.

노드번호	노드 한계비용(CM: Nodal Cost)	노드 혼잡비용(CC: Congestion Cost)
1	8.7291	12.7998
2	7.7509	-19.9734
3	7.7726	21.5208
4	8.9682	100.4294
5	9.4465	0.0000
합계		114.7785

발전소가 받아야 할 금액	1259.1528
수용가가 지불해야할 금액	1373.9204
합계	114.7785

그림 7 모션한계비용 및 혼잡비용의 계산결과

선로에서의 혼잡비용은 선로 양단 모선의 모션한계비용의 차이와 선로조류의 곱으로 계산된다.

$$\begin{aligned} CC_1 &= (8.2509 - 8.7291) \times (-26.7647) = 12.7998 \\ CC_2 &= (7.7726 - 8.2509) \times (41.7647) = -19.9734 \\ CC_3 &= (8.9682 - 8.7291) \times (90) = 21.5208 \\ CC_4 &= (9.4465 - 7.7726) \times (60) = 100.4294 \\ CC_5 &= (9.4465 - 8.9682) \times (0) = 0 \end{aligned}$$

따라서 전체혼잡비용은  $114.7 = \sum_{i=1}^5 CC_i$ 이 되어 모션에서 계산된 값과 일치함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 시간대 별로 변하는 전력가격을 인터넷 기반에서 온라인으로 처리하는 최적조류계산 프로그램을 개발하였다. 이는 발전사업자의 입찰 전략측면에서 보다 효과적으로 이용될 수 있을 것이다. 또한 각 모션과 선로에서의 혼잡비용을 잠재가격과 모션한계비용을 이용하여 계산하는 방법과 의미를 분석함으로써 송전시스템의 새로운 투자를 위한 신호로 이용될 수 있다.

이 프로그램을 기반으로 사용자가 발전사업자와 수용가를 독점하지 않고 거래 참여자들이 직접 자신들의 입찰 전략을 입력할 수 있는 프로그램 개발을 연구해 나갈 것이다.

### (참고 문헌)

- [1] S. Hunt, G. Shuttlesworth, *Competition and choice in Electricity*, John Wiley & Sons, 1996.
- [2] Erickson, Fritz J, *Internet Primer : Getting Sta the internet*, Richard d Irwin, 1996.
- [3] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, C. M. Shetty, *Nonlinear Programming*, John Wiley & Sons, 1993.
- [4] A. A. El-Keib, X. Ma, "Calculating Short-Run Margina Cost of Active and Reactive Power Production," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.2, pp.559-565, May 1997.
- [5] T. W. Gedra, "On Transmission Congestion and Pricing," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.1, pp.241-248, February 1999.
- [6] Elizabeth Castro, *Perl and CGI for the World Web*, Addison Wesley Longman, Inc. 1998.
- [7] Larry Wall, Tom christiansen, Randal L. sch *Programming Perl*, O'Reilly & Associates, 1997.