

연계계통에서 가용송전용량 평가를 위한 최적화 알고리즘의 비교

論文
55A-12-7

Comparison of Optimization Algorithms for Available Transfer Capability Assessment in Interconnected Systems

金圭浩* · 宋敬彬†
(Kyu-Ho Kim · Kyung-Bin Song)

Abstract - Available transfer capability(ATC) is an important indicator of the usable amount of transmission capacity accessible by several parties for commercial trading in power transaction activities. This paper deals with an application of optimization technique for available transfer capability(ATC) calculation and analyzes the results of ATC by considering several constraints. Especially several optimization techniques are used to solve the ATC problem with state-steady security constraints. The results are compared with that of repeat power flow(RPF), sequential quadratic programming(SQP) and linear programming(LP). The proposed method is applied to 10 machines 39 buses model systems to show its effectiveness.

Key Words : Total Transfer Capability(TTC), Available transfer capability(ATC), Linear Programming(LP), Repeat Power Flow(RPF), Sequential Quadratic Programming(SQP)

1. 서론

최근 전력산업은 산업의 구조, 경영 및 운영에 있어서 급격한 변화를 맞이하고 있다. 기존의 단일전력회사 체계로 운영되던 전력산업을 발전, 송전 및 배전 등으로 세분함으로써 발전 및 판매에 경쟁을 유발시켜 소비자에 있어 고품질, 신뢰도 향상, 다양한 선택권, 저렴한 가격 등을 제공하고 계통의 효율성을 높임으로써 전력산업의 이익을 보장하는 것이다. 이러한 구조개편에 의하여 전력회사는 이익을 높여려는 시장논리에 따라 발전기 및 송전선로 등을 운영하게 되었다. 결국, 송전선로를 안전하게 운용하면서 상업적으로 효율성을 높이기 위하여 그림 1.1과 같이 연계선로(Tie-Line)에 있어서 기존에 사용하고 있는 송전용량에 추가적으로 사용할 수 있는 용량이 중요성을 띄게 되었다. 이 용량을 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)이라고 한다[1-3].

현재 우리나라의 전력수요의 약 43%는 수도권으로 분포되어 있으며, 발전설비의 대부분은 영호남 지역에 상당수 분포되어 있으므로 전력조류의 상당 부분이 수도권으로 북상되어 보내지고 있다는 것을 알 수 있다. 수도권 지역의 전력수요의 증가에 따라 송전선로를 통하여 안전하면서 신뢰성 있게 전력을 공급하기 위해서는 새로운 설비를 건설하는 것이 타당하나 전력시장이 경쟁적 체제로 변화됨

에 따라 기존의 송전계통을 효율적이면서 합리적으로 운영하는 것이 필요하다.

기존 전력이 송전되고 있는 상태를 기준상태(Base case)라 정의하며, 일반적으로 ATC 계산은 계통운영자에 의하여 미리 선정된 상정사고 목록을 바탕으로 기준상태 및 상정사고가 발생하였을 경우를 가정하여 각각 ATC를 계산한다. 이중 가장 작은 경우의 송전용량을 최종적인 ATC로 결정하게 된다. 이러한 상정사고를 고려하는 과정을 통하여 안전도와 신뢰도를 보장하는 추가적인 전력거래가 가능해진다[1].

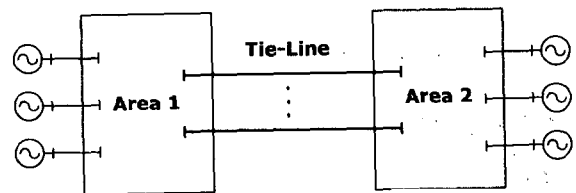


그림 1.1 연계계통
Fig. 1.1 Interconnected System

ATC를 결정하는데 있어 선행되어야 하는 요소는 총송전용량(Total Transfer Capability : TTC), 송전신뢰도 여유용량(Transmission Reliability Margin : TRM) 및 설비편의 여유용량(Capacity Benefit Margin : CBM)이다. 이것으로부터 ATC는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$ATC = TTC - TRM - CBM \quad (1.1)$$

† 교신저자, 正會員 : 崇實大學校 電氣工學部 助教授 · 工博
E-mail : kbsong@ssu.ac.kr

* 正會員 : 安山工科大學 電氣科 副教授 · 工博,
接受日字 : 2006年 10月 26日
最終完了 : 2006年 11月 16日

여기서, 식 (1.1)에서 TTC는 한 지역에서 다른 지역으로 계통 안전도의 위반 없이 안전하게 송전할 수 있는 최대 송전용량으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TTC = \text{Min. of } \{ \text{Thermal, Voltage, Stability Limit} \} \quad (1.2)$$

계통 상황이 변화함에 따라 식 (1.2)의 세가지 제약조건도 변화되며 세 제약조건 중 송전용량을 가장 제약하는 요소에 의해 TTC가 결정된다. 일반적으로 안정도 제약에 의해 가장 많이 제약을 받는 것으로 알려져 있다. TRM은 계통의 불확실성을 고려하여 전력계통의 안전한 운전을 보장하기 위해 필요한 여유용량이다. CBM은 연계계통에서 외부계통의 예비력 이용을 보장하여 발전설비 신뢰도 기준을 만족시키기 위해 필요한 여유용량이다.

ATC를 계산하는데 있어서 반복조류계산(Repeat Power Flow : RPF)과 연속조류계산(Continuous Power Flow : CPF)은 정확한 값을 계산할 수 있는 반면 계산시간이 과다하다[4]. 정확한 결과를 얻을 수 있으며 동시에 짧은 계산시간을 요구하는 실시간 운영기법이 요구된다. 실시간 운영에 적합한 기법으로 PTFD(Power Transfer Distribution Factor) 기법과 같은 결정론적 ATC 계산 기법이 개발되었다[5]. 이것은 DC 조류계산을 이용한 ATC 계산 기법으로 사용되고 있으며 매우 짧은 계산시간을 보이고 있다. 그렇지만 PTFD 기법은 유효전력만을 고려한 일차 선형화 기법이기 때문에 매우 큰 오차를 보이는 단점이 있다. PTFD법의 단점을 개선하기 위하여 무효전력을 고려한 QFA(Quadratic Function Approximation) 기법이 연구되었다[6].

본 논문에서는 최적화 알고리즘을 이용하여 연계계통의 ATC를 평가하였다. 알고리즘은 RPF, 순차적2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP) 및 선형계획법(Linear Programming : LP)를 사용하여 비교하였으며, 연계선로를 포함 모든 선로의 열용량 제약과 전압안정도 제약인 전압 제약조건을 고려하여 ATC를 계산하였다.

제안한 ATC 계산 기법의 효용성을 입증하기 위하여 10기 39모선 계통에 적용하여 비교하였다.

2. 총송전용량 계산 알고리즘

2.1 RPF를 이용한 정식화

RPF은 최대 주입전력량을 찾는 일반적인 방법으로, 부하가 증가하는 지역의 유효전력을 계통 안전도 위반을 넘지 않는 범위까지 증가시킴으로써 최종적으로 TTC를 계산할 수 있는 방법이다[4]. 인접한 공급지역(source area)과 수요지역(sink area)을 연결하고 있는 연계선로를 이용하여 TTC를 결정하는 수학적인 표현은 식 (2.1)과 같다[4,7].

연계선로에 흐르는 최대전력조류를 계산하기 위해 식 (2.1)의 제약조건에서 수요지역 모선의 부하증가를 표현하기 위하여 λ 의 함수로 나타내었으며, 식 (2.1)에서 $\lambda=0$ 인 초기상태로부터 $\lambda=\lambda_{\max}$ 가 될 때 까지 λ 를 증가시켜 P_{Li0} , Q_{Li0} 를 최적화시킨다.

$$\text{Max. } \sum_{t=1}^T P_t \quad (2.1)$$

$$P_G - P_L - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_G - Q_L - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$S_{ij} \leq S_{ij, \max}$$

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max}$$

$$P_L = P_{L0} (1 + \lambda K_{PR})$$

$$Q_L = Q_{L0} (1 + \lambda K_{QR})$$

여기서,

t : 연계선로 인덱스

T : 전체 연계선로의 수

P_i, Q_i : 모선 i 에서 유효 및 무효전력

G : 발전기 인덱스

L : 부하 인덱스

N : 전체 모선의 수

G_{ij}, B_{ij} : 모선어드미턴스

S_{ij} : 송전 선로 ij 의 피상전력

$S_{ij, \max}$: 송전 선로 ij 의 정격용량

θ_{ij} : 모선 i 와 j 의 위상각 차

V_i : 모선 i 의 전압크기

$V_{i, \max}, V_{i, \min}$: 모선 i 의 전압크기 상하한치

P_{L0}, Q_{L0} : 모선 i 에서의 기준사례(Base Case) 주입전력량

K_{PR}, K_{QR} : participation factor

λ : 모선 발전량 증가를 표현하는 파라미터는 $\lambda=0$ 기준 사례, $\lambda=\lambda_{\max}$ 일 때 최대전력전송

2.2 SQP를 이용한 정식화

SQP은 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다[8]. SQP 방법의 일반적인 알고리즘 구성을 요약하면 다음과 같이 3단계로 구성된다.

절차 1 : 초기화(initialize)

변수 x_0 , 탐색방향 d_0 , step size t_0 . 변수 x_0 가 실행불가능 영역의 초기값일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(search)

- i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산하여 탐색 방향을 결정한다.
- ii) 목적함수와 등식, 부등식의 모든 제약을 만족하는 step size를 결정한다.

절차 3 : 반복계산(update)

- i) 헤시안 행렬 업데이트.
- ii) $x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \tilde{d}_k$
 여기서, t_k : k 번째 step size
 d_k : k 번째 탐색 방향
 \tilde{d}_k : d_k 를 사용해 얻어지는 QP 문제의 해
- iii) 제약식을 포함한 라그랑주 문제의 해석

$$\min \left\| \sum_{j=1}^{n_f} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^{t_i} \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{t_e} \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{t_e} \mu_j \nabla h_j(x_{k+1}) \right\|^2 \quad (2.2)$$

여기서, $\zeta_{k,j}, \xi_k, \mu_{k,j}, \lambda_{k,j}$ 는 QP 문제 및 제약식과 관련된 K-T승수이다.

2.3 선형계획법 응용을 위한 선형화

식 (2.1)에 정식화된 것을 LP를 이용하여 ATC를 계산하기 위하여 각각의 목적함수, 등식 제약조건 및 부등식 제약조건을 선형화하여야 한다[7]

- 목적함수

연계선로의 조류식은 모선전압의 위상각, 모선전압의 크기, 부하증가 파라미터, 위상변환기 위상각 및 공급지역의 발전기 유효전력출력의 함수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 공급지역에서 수요지역으로의 전력을 비상시에 최대한 전달하는 것이므로 연계선로를 통하여 공급지역으로부터 수요지역까지 전달되는 전력을 최대한 하는 것을 목적으로 하였다.

$$\text{Max. } f_{ij} = \sum [(V_i/t_{ij})^2 - (V_j/t_{ij}) V_j \cos(\theta_i - \theta_j) g_{ij} - (V_i/t_{ij}) V_j \sin(\theta_i - \theta_j) b_{ij}] \quad (2.3)$$

$$i \in \text{Source Area}$$

$$j \in \text{Sink Area}$$

식 (2.3)의 연계선로조류 식을 모선전압의 위상각 및 크기, 부하증가 파라미터, 위상변환기 위상각, 공급지역의 발전기 유효전력출력에 대하여 선형화 하면 식 (2.4)로 된다.

$$\text{Max. } \Delta f_{ij} = \left[\frac{\partial f_{ij}}{\partial \theta} \quad \frac{\partial f_{ij}}{\partial V} \quad \frac{\partial f_{ij}}{\partial \lambda} \right] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서, 각 항목 즉 변수에 대한 목적함수의 감도는 다음과 같다.

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \theta} : \text{모선전압의 위상각에 대한 연계선로조류 감도정수}$$

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial V} : \text{모선전압의 크기에 대한 연계선로조류 감도정수}$$

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \lambda} : \text{부하증분에 대한 연계선로조류 감도정수}$$

- 등식제약 조건

식 (2.1)의 등식제약 조건에 대한 선형화는 뉴턴-랩슨법을 이용한 조류계산의 수정방정식과 유사하게 각 변수에 대하여 테일러 전개하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{P\lambda} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{Q\lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

모선 i 와 j 사이의 어드미턴스, 유효전력 및 무효전력에 대한 전력방정식 그리고 수정방정식을 이용하여 식 (2.5)의 감도를 상세히 나타낼 수 있다. 나머지 항은 뉴턴-랩슨법을 이용한 조류계산의 수정방정식과 동일하다.

$$J_{P\lambda} = \frac{\partial P}{\partial \lambda} = P_{\lambda} \quad (2.6)$$

$$J_{Q\lambda} = \frac{\partial Q}{\partial \lambda} = Q_{\lambda} \quad (2.7)$$

- 부등식제약 조건

제어 및 상태변수에 대한 상하한치는 식 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

$$S_{ij} \leq S_{ij,\max}$$

식 (2.8)을 증분형태로 하면 식 (2.9)와 같다.

$$\Delta V_{i,\min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V_{i,\max} \quad (2.9)$$

$$\Delta \lambda_{\min} \leq \Delta \lambda \leq \Delta \lambda_{\max}$$

$$\Delta S_{ij} \leq \Delta S_{ij,\max}$$

여기서

$$\Delta V_{i,\max} = V_{i,\max} - V_i \quad \Delta V_{i,\min} = V_{i,\min} - V_i \quad (2.10)$$

$$\Delta \lambda_{\max} = \lambda_{\max} - \lambda \quad \Delta \lambda_{\min} = \lambda_{\min} - \lambda$$

각각의 선로조류에 대한 제약조건을 선형화하면 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{\partial S_{ij}}{\partial \theta} \quad \frac{\partial S_{ij}}{\partial V} \quad \frac{\partial S_{ij}}{\partial \lambda} \right] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \leq [S_{ij,\max} - S_{ij,\text{flow}}] \quad (2.11)$$

3. ATC 결정

3.1 TRM 및 ATC 계산

TRM은 계통 상태에 있어 고유의 불확실성을 고려한 것으로 운영상의 유연성을 확보함으로써 계통상태의 변화로부터 안전하게 계통을 운영할 수 있도록 한다. 그러므로 TRM을 고려하기 위해서는 계통에서 발생 가능한 모든 경우를 고려해야만 한다. TRM을 결정하는 과정은 그림 3.1과 같이 기준상태의 TTC와 고려할 수 있는 모든 경우의 TTC를 계산한다. 기준상태의 TTC와 가장 작은 TTC의 차이가 TRM이 된다. CBM을 고려하지 않는다면 식 (1.1)에 나타낸 것과 같이 기준상태의 TTC에서 TRM을 제외한 값, 즉 가장 작은 값을 갖는 TTC가 ATC가 될 수 있다[1].

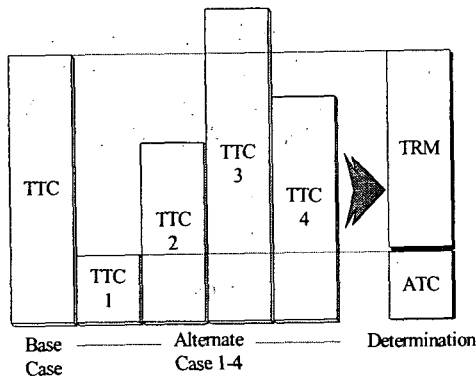


그림 3.1 여러 가지 경우로부터의 TRM 결정
Fig. 3.1 Determination of TRM from Alternate Cases

3.2 CBM 계산

CBM은 연계계통의 예비력에 접근하기 위한 여유 송전용량으로 정의되며 이를 통해 예비력 신뢰도 요구 기준을 맞출 수 있다. CBM을 쉽게 계산할 수 있는 방법은 수요지역에서 발전기가 탈락할 경우를 대비하여 공급지역에서 추가로 보낼 수 있는 용량이다. 따라서 CBM은 식 (1.1)에 나타낸 것과 같이 수요지역의 발전기가 탈락할 경우를 대비하여 TTC에서 제외해야 한다.

4. 사례 연구

본 연구에서는 ATC에 영향을 미치는 여러 가지 제약조건을 고려하여 ATC를 계산하였다.

그림 4.1의 IEEE 10기 39모선 모델계통에 적용하여 제안한 ATC 계산 기법의 효용성을 입증하였다. IEEE 10기 39모선 모델계통에서 지역 2에서 부하가 증가하면 두 지역을 연계하는 송전선로 3개(모선 16 - 17, 모선 11 - 6, 모선 14 - 4)를 이용하여 지역 1에서 공급하는 것으로 하였다.

지역 2의 부하증가에 대하여 지역 1에서 공급하는 것을 원칙으로 하였다. ATC 계산을 위하여 조류계산을 할 경우 손실을 어느 발전기에서 담당하는 것으로 하는가에 따라 계통손실이 크게 차이가 발생한다. 특히 부하가 많은 지역과 반대 지역에 슬랙모선이 있으면 계산상으로 손실이 크게 발생한다. 따라서 ATC 계산시 손실을 담당하는 슬랙모선을 어느 지역의 모선으로 선정하는 것이 중요하다고 볼 수 있

으나 일반적으로 전력을 공급하는 공급지역의 발전기를 선정한다.

또한, ATC 계산에 있어 CBM은 고려하지 않았기 때문에 TRM은 기준상태의 TTC에서 가장 작은 TTC 레벨을 빼는 것으로 하였다. 다음의 두 가지 경우에 대하여 비교하였다.

Case 1 : 공급지역은 Area 1이며 전력공급은 발전기 모선 35(슬랙모선)에서 공급하는 것으로 하였다. 수요지역은 Area 2이며 모선 4에서 부하가 증가하는 것으로 하였다.

Case 2 : 공급지역은 Area 1이며 전력공급은 Area 1의 슬랙모선을 제외한 모든 발전기에서 공급하는 것으로 하였다. 수요지역은 Area 2이며 부하증가는 Area 2의 모든 모선에서 증가하는 것으로 하였다.

Case 1에서 다수의 선로사고 그리고 연계선로의 사고가 발생하는 것을 가정하여 TTC를 계산하였으며 결과는 그림 4.2에 나타내었다. 그림 4.2에서 알 수 있듯이 가장 작은 TTC 레벨은 모선 4 - 5의 선로사고에서 발생하며, TRM은 기준상태의 TTC에서 가장 작은 TTC를 뺀 것이다. 결국, 가장 작은 TTC가 ATC가 된다. 이것은 지역 2의 모선 3 - 4의 선로에서 제약(150MW)에 걸렸으며 TTC는 37.54이다. 그러나 모선 4 - 14의 연계선로에는 389.3MW의 조류가 발생하였으며, 선로제약(400MW)에 대하여 여유는 있으나 다른 선로에서 제약에 걸리기 때문에 더 이상 지역 2로 송전할 수 없는 것이다. 표 4.1에서 RPF, SQP 및 LP를 이용하여 계산한 ATC를 비교하였다. RPF의 결과를 가장 정확한 것이라고 가정하였을 때 SQP의 결과뿐만 아니라 LP의 결과도 우수함을 알 수 있다. 또한 표 4.2의 계산시간의 비교에 있어서 LP를 사용하는 것이 가장 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

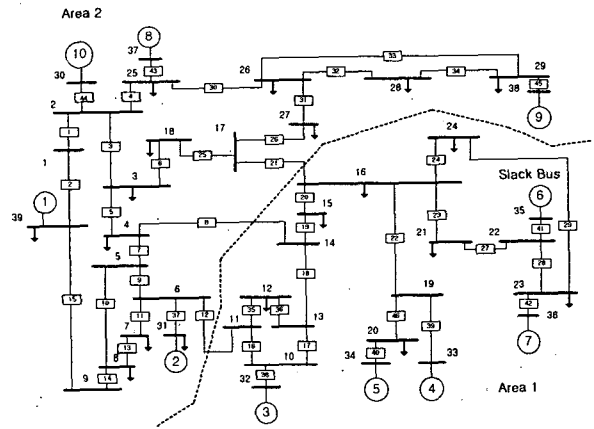


그림 4.1 10기 39모선 계통도
Fig. 4.1 10 machines and 39 buses systems

Case 2에서 Case 1의 경우 처럼 다수의 선로사고 그리고 연계선로의 사고가 발생한 경우에 대하여 ATC와 각각의 알고리즘의 계산 결과를 그림 4.3, 표 4.3 그리고 표 4.4에 나타내었다. 그림 4.3에서 알 수 있듯이 가장 작은 TTC인 74.677MW이 ATC가 된다. 이 결과는 모선 6 - 11의 연계선로에는 399.9MW의 조류가 발생하였으나 이 연계선로의

선로제약(400MW)에 걸리기 때문에 더 이상 지역 2로 송전할 수 없는 것이다. Case 1의 결과처럼 RPF, SQP 및 LP를 이용하여 계산한 ATC를 비교하였으며, 표 4.4의 계산시간의 비교에 있어서 LP를 사용하는 것이 가장 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

Case 1과 Case 2에 있어서 CBM을 고려하지 않았기 때문에 ATC가 너무 크게 평가된 것이며 CBM을 고려하게 되면 ATC는 더 작아지게 될 것이다.

또한, 국내 전력계통에 대하여 ATC를 계산하기 위해서는 지역(Area)이 아닌 Zone의 형태로 설정하여 평가할 수 있다.

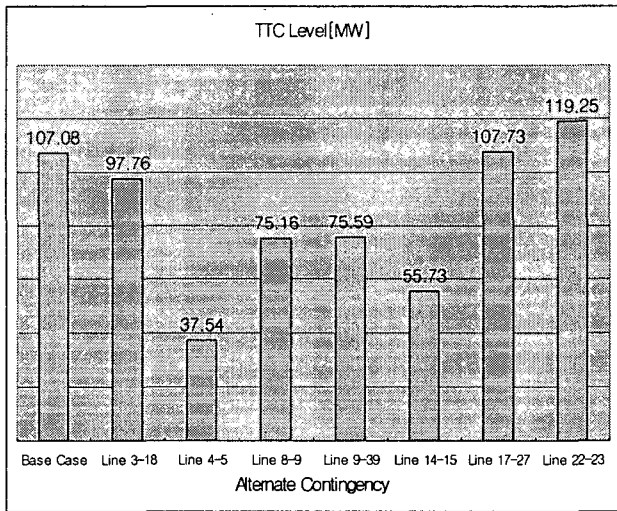


그림 4.2 다양한 상정사고에 대한 TTC 레벨의 비교
Fig. 4.2 Comparison of TTC Level by Alternate Contingency

표 4.1 TRM과 ATC의 비교
Table 4.1 Comparison of TRM and ATC

상정사고		기준상태 지역 1	모선 4-5 선로사고
RPF	TTC	107.090	37.540
	TRM	69.55	
	ATC	37.540	
SQP	TTC	107.091	37.542
	TRM	69.549	
	ATC	37.542	
LP	TTC	107.093	37.543
	TRM	69.550	
	ATC	37.543	

표 4.2 ATC 계산 알고리즘의 비교
Table 4.2 Comparison of Algorithms for ATC Calculation

	RPF	SQP	LP
CPU Time[sec]	5	3	0.5

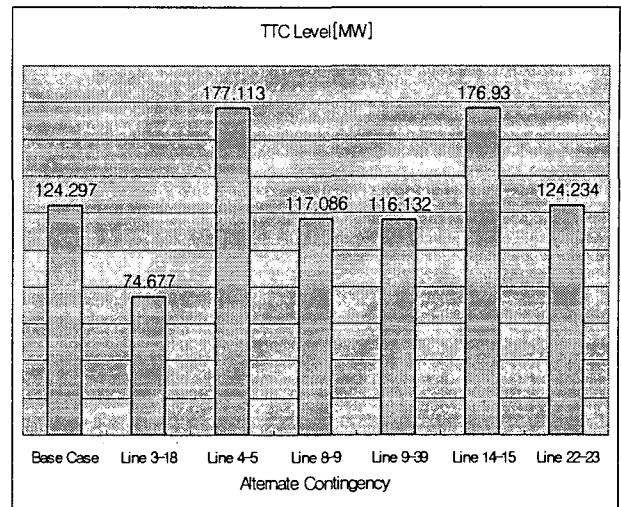


그림 4.3 다양한 상정사고에 대한 TTC 레벨의 비교
Fig. 4.3 Comparison of TTC Level by Alternate Contingency

표 4.3 TRM과 ATC의 비교
Table 4.3 Comparison of TRM and ATC

상정사고		기준상태 지역 1	모선 4-5 선로사고
RPF	TTC	124.294	74.672
	TRM	49.622	
	ATC	74.672	
SQP	TTC	124.296	74.676
	TRM	49.620	
	ATC	74.676	
LP	TTC	124.297	74.677
	TRM	49.62	
	ATC	74.677	

표 4.4 ATC 계산 알고리즘의 비교
Table 4.4 Comparison of Algorithms for ATC Calculation

	RPF	SQP	LP
CPU Time[sec]	2	2	0.4

5. 결 론

본 논문에서는 최적화 알고리즘을 이용하여 연계계통의 가용송전용량을 평가하였다. 연계선로를 포함함 모든 선로의 열용량 제약과 안전도 제약인 전압 제약조건을 고려하여 ATC를 계산하였다. 알고리즘은 반복조류계산법, 순차적2차 계획법 및 선형계획법을 사용하여 ATC와 계산시간을 비교하였다. 결과에 있어서 세 알고리즘 모두 차이가 없었으며, 계산시간에 있어서는 선형계획법을 이용한 것이 가장 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구로는 ATC 평가에 가장 큰 영향을 미치는 과도 안전도 제약을 고려하여 더욱 정확한 ATC를 평가할 것이다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

참고 문헌

- [1] North American Electric Reliability Council (NERC), "Available Transfer Capability - Definitions and Determinations", NERC Report, June 1996.
- [2] P. W. Sauer, "Technical Challenges of Computing Available Transfer Capability (ATC) in Electric Power Systems", Proceedings, 30th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Jan. 1997.
- [3] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang, W. F. Tinney, "Available Transfer Capability Calculations", IEEE Trans. on Power System, Vol. 13, No. 4, Nov.1998.
- [4] V. Ajjarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power System, Vol. 7, no. 1, pp.416-423, February 1992.
- [5] H. H. Yan, "PTDF and TLR from a Power Marketer's perspective", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol. 1, pp. 156-161. 1999.
- [6] 이효상, 신상현, 신동준, 김진오, "이차삼수 근사화를 이용한 가용송전용량과 송전신뢰 및 설비편익 여유도 산정", 대한전기학회 논문지, 제53A권, 제5호, pp.296-301, 2004
- [7] 김규호, 송경빈, "선형계획기반 선로혼잡처리에 대한 총송전용량 평가", 대한전기학회 논문지, 제55권 11호, pp.567-572(?), 2006년 11월
- [8] C. T. Lawrence and A. L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996.

저 자 소 개



김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 안산공과대학 전기과 부교수.



송경빈 (宋敬彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M전기공학과 졸업(공학박). 1996년 한전전력연구원 선임연구원. 1998년 대구효성가톨릭대학교 전임강사. 2000년 계명대학교 전임강사. 2002년 숭실대학교 전기제어시스템공학부 전임강사. 2004년-현재 숭실대학교 전기공학부 조교수.