

전력계통의 TTC(Total Transfer Capability) 산정을 위한 수송능력평가 프로그램의 향상

김상암 이병준 송길영
고려대학교 전기공학과

Enhancement Power System Transfer Capability Program (PSTCP)
To Calculate Total Transfer Capability in Power Systems

Sangahm Kim Byungjun Lee Kil-Yeong Song
School of Electrical Engineering, Korea Univ.

Abstract - This paper presents a sequential framework that calculates the total transfer capabilities of power transmission systems. The proposed algorithm enhances the Power System Transfer Capability Program (PSTCP) in conjunction with the Continuation Power Flow(CPF) that is used for steady-state voltage stability analysis and modified Arnoldi-Chebyshev method that calculates rightmost eigenvalues for small signal stability analysis. The proposed algorithm is applied to IEEE 39-bus test system to calculate TTC.

계 전송할 수 있는 전력의 양으로 정의된다[1]. TTC는 계통의 물리적, 전기적 특성에 의하여 제한을 받게 되는데, 그 제약들은 선로의 열용량 한계, 부하모선에서 허용되는 전압의 한계, 전압안정도 한계, 과도안정도 및 미소신호안정도의 한계를 모두 포함하게 된다. 이러한 한계를 모두 고려하게 될 때 TTC는 각각의 제약에서 계산된 전송능력중 제일 작은 값으로 정의된다. 본 논문에서는 앞에서 언급된 제약중 과도안정도를 제외한 전 제약을 고려하는 TTC를 식(2)와 같이 정의하고, 이의 산정이 가능한 알고리즘을 제안하고자 한다.

$$TTC = \text{Minimum of } \{P_{th}, P_{vl}, P_{vs}, P_{sss}\} \quad (2)$$

1. 서론

세계 각국의 전력분야에서는 시장경쟁원리를 도입하는 구조개편을 본격화하고 있으며, 우리 나라의 전력산업도 경쟁을 도입하여 전력공급의 효율성을 제고하고 장기적으로 값싸고 안정적으로 전력을 공급하려는 계획이 수립중에 있다. 송전가능용량(ATC)/송전허용용량(TTC)의 산정은 새로운 전력산업 구조에서 전력시장과 송전계통의 관리 및 운영에 필수적인 기능이다. 송전가능용량(Available Transfer Capability, ATC)은 계통의 다양한 제약을 고려하였을 때 특정지역 사이에 미래의 상업적인 전력거래를 위해 현재시점에서 전송가능한 계통이 보유하고 있는 전력의 수송능력으로 정의된다. NERC에서는 ATC와 TTC의 관계를 다음 식(1)과 같이 표현하고 있다 [1].

$$ATC = TTC - TRM - ETC(\text{CBM 포함}) \quad (1)$$

식 (1)에서 TTC는 Total transfer capability, TRM은 Transmission reliability margin, ETC는 Existing transmission commitments, CBM은 Capacity benefit margin을 의미한다.

TRM과 ETC는 불확실성, 신뢰도, 지역부하 및 계통 운용 보조서비스 등을 포함한 양으로서 계통조건과 고려해야하는 시간대역에 매우 의존적인 파라미터들의 합수이고 따라서 동적으로 변화하는 양으로 정의된다. TRM과 ETC에 대한 일반적 정의와 계산법은 아직 확립되어 있지 않기 때문에 본 논문에서는 TRM과 ETC와 무관한TTC 계산에 초점을 맞추기로 한다. 향후 연구가 진행되어 TRM과 ETC의 산정이 가능하여질 경우 ATC산정도 본 논문에서 제안하고자 하는 방법으로 동일하게 산정될 수 있다.

여기서 P_{th} , P_{vl} , P_{vs} , P_{sss} 는 각각 열용량한계, 전압상하한한계, 전압안정도 한계, 미소신호안정도 한계점에서의 전송능력을 의미한다.

TTC는 계통의 구성과 운용상황에 따라 중요제약이 달라지게 된다. 다음 그림 1은 계통의 운용 및 계획시간대역에서 TTC를 나타내고 있다. 그림1에서 A시점까지의 중요제약이 전압수준이었고, 중요제약이 A시점과 B시점사이에서는 열용량 제약으로 바뀌고, B시점이후는 안정도가 가장 중요한 제약으로 되고 있는 경우를 보이고 있다. 이 때 TTC는 시간대역별로 바뀌게 되며, 따라서 변화하는 계통조건과 운용상황을 고려하여 일정주기마다 TTC를 다시 계산하여 제용운용에 반영하여야 한다.

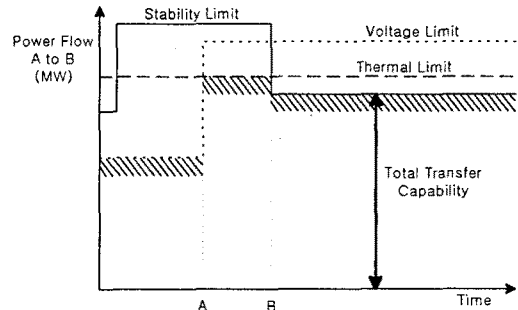


그림 1 송전허용용량(TTC)의 제약들

2.2 TTC의 계산

TTC를 계산하기 위해서는 선로조류, 전압상하한 및 안정도제약을 동시에 고려하여 문제를 푸는 통합해법을 생각해 볼 수 있다. 이러한 방법은 일반적으로 최적화문제나 구성하거나 모든 제약을 고려한 계통신뢰도수준을 확률론적 방법으로 풀수 있지만, 일반적으로 전압 및 과도안정도제약을 최적화문제의 제약으로 구성하는 것은 매우 어렵고, 이러한 방법을 구현하기 위해서는 앞으로

2. TTC의 정의와 계산

2.1 TTC의 정의

송전허용용량(Total Transfer Capability, TTC)은 계통에서 가능한 상정사고를 고려하여 특정지역간에 신뢰성있

많은 연구가 필요하다. 본 논문에서는 후자와 같이 각 제약에 대한 계통의 공급능력을 순차적으로 산정하여 TTC를 계산하는 방법을 보이고, 각 제약에 대해 효과적으로 전송능력을 산정하는 알고리즘을 설명한다.

3. TTC계산을 위한 수송능력평가프로그램의 향상

3.1 수송능력 평가프로그램(PSTCP)의 소개

수송능력평가 프로그램[5]은 계획자가 계통설비의 확장안을 결정하는데 사용할 목적으로 개발되었으며, 수송능력 평가지수를 이용하여 계통이 확장되어갈 때 수송능력의 변화추이를 계획자에게 제공하여 의사결정에 참고하도록 되어있다. 본 절에서는 수송능력평가를 위한 기본 물리량인 최대부하공급능력과 경제부하공급능력을 소개하도록 한다.

3.1.1 최대부하공급능력(MLSC)의 산정

전력계통의 최대부하공급능력(MLSC)은 주어진 발전용량이 계통제약하에서 얼마나 많은 전력을 계통의 부하에 공급할 수 있는가를 나타내는 전력계통의 양적인 수송능력을 나타낸다. 따라서, 계통의 최대부하공급능력은 계통이 수송할 수 있는 가장 낙관적인 수송능력에 해당하는 발전력배분과 같다. 계통의 최대수송능력 산정문제는 다음과 같이 비선형 최적화문제로 정식화된다.

▶ 목적함수 : $\text{Max} \left[\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} \right]$ (3)

▶ 제약조건 : 교류회로방정식 (4)

수급균형제약 $\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{N_L} P_{Li} + P_{\text{loss}}$ (5)

$P_{Li} = P_{L0i}(1 + R)$ (6)

선로조류상한제약 (7)

부하미소신호안정제약 (8)

발전기유효전력출력의 상한제약 (9)

발전기무효전력출력의 상한제약 (10)

PSTCP에서는 계통의 수송능력 평가지수를 산정하기 위하여 최대부하공급능력에 대해서는 (N-1)상정사고를 일괄 처리하도록 하고 있다. 이는 안전도를 고려하는 TTC의 정의와 일맥상통하고 있으므로 그 응용이 매우 용이하다.

3.1.2 경제부하공급능력(ELSC)의 산정

최대부하공급능력의 산정법에서는 경제급전의 개념이 포함되어 있지 않으므로 그와 같은 발전력배분이 가능하더라도 경제운영의 면에서 본다면 다소 현실적이지 못할 수도 있다. 그러므로, 계통계획단계에서는 최대부하공급능력과 함께 경제급전의 개념을 포함하여 수송능력을 현실적으로 고려할 필요가 있다. 즉, 최대부하공급능력이 경제운영으로부터 벗어나더라도 가능한 한 공급을 최대화하는 데에 초점을 맞춘 발전기들의 부하배분을 나타내는데 대하여 경제부하공급능력은 계획단계에서 경제성을 감안해서 발전력 배분을 수행할 때 선로과부하 제약과 같은 중요한 계통제약에 영향을 받지 않고 수송 가능한 최고 부하수준에서의 발전력배분을 의미한다.

계제완화환경에서 공급점이 여러 대의 발전기로 구성되어 있는 경우 경제부하공급능력은 경제성 관점에서의 복합계통의 수송능력을 나타내는 것으로 견고한 계통일수록 경제급전 원칙에 대해 운전제약의 위반없이 충분히 부하를 수송할 수 있는 적절한 수송능력을 가지고 있어야 한다는 것을 만족한다.

3.2 TTC 계산을 위한 PSTCP의 수정

3.2.1 공급점(source)/수전점(sink)의 고려

MLSC 및 ELSC의 산정 프로그램을 이용하면 최소한 열용량 및 전압상한제약을 만족하는 계통의 송전허용용량(TTC)을 구하는데 바로 이용될 수 있다. TTC는 고려하는 지역간(source to sink)의 경로에 따라 다를 뿐 아니라 방향성을 가지고 있으므로 최대부하공급능력문제의 해를 얻는 과정에서 지역간 경로를 반영하여야 한다. 이를 반영하기 위하여 MLSC를 위한 정칙중식 (3)의 목적함수에 특정지역의 발전량만을 최대화하도록 하고 제약식중식 (6)의 부하분담비 R을 조정함으로써 고려하는 지역발전량(source)과 지역부하(sink)만을 최적화과정 에 포함되도록 할 수 있다.

▶ 수정된 목적함수 $\text{Max} \left[\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gpi} \right]$
(N_{Gp} : p지역의 발전기수) (11)

▶ 수정된 제약조건 (5)

$P_{Li} = P_{L0i}(1 + R_q)$ (R_q 는 q지역부하의 분배량) (12)

수정된 PSTCP를 이용하여 얻어진 최적해는 특정지역부하(sink)에 공급할 수 있는 최대의 특정지역발전량(source)이므로 언급한 두가지 제약하의 최대전력전송능력이라고 할 수 있다.

3.2.2 전압안정도 및 미소신호안정도 제약의 고려

열용량 제약 및 전압한계 제약을 고려한 TTC를 계산한 후, 이때의 전력전송량으로 시작하여 전송량을 변화시키며 전압안정도 및 미소신호안정도 한계점을 탐색하게 된다. 이때 전압안정도 나 미소신호안정도 한계점에 대응되는 TTC의 값이 앞절에서의 것과 비교하여 최소치가 대상계통의 TTC로 산정되며, 이에 대응되는 제약이 중요 제약이 된다. 제약의 추가로 인한 변경되는 TTC의 값을 순차적으로 고려하기 위하여 아래와 같은 탐색알고리즘이 개발되어 PSTCP에 추가되었다.

운전점의 경로탐색

운전점의 경로를 추적하는 작업은 강인한 수렴성을 제공하는 연속알고리즘을 조류방정식에 접목한 연속조류계산 알고리즘을 이용하게 된다[4]. 연속조류계산은 현재의 운전점으로부터 부하의 변화에 따라 변화하는 운전점의 추정값을 구하는 예측과정과 이값을 이용하여 정확한 조류해를 구하는 수정과정으로 이루어져 있으며, 부하수준에 대응하는 운전점이 존재하지 않을 경우 근접한 운전점을 자동적으로 구할 수 있는 기능을 갖고 있다.

전압안정도 한계점의 탐색

운전점의 경로를 탐색하는 과정에서 전압안정도 제약에 따르는 한계점은 연속조류계산 알고리즘의 수정과정에서 사용되는 접선벡터를 이용하여 탐색하게 된다. 전압안정도 한계점에서 부하의 증가에 대응하는 접선벡터의 성분은 0이되고 한계점 전후에서 이 성분의 부호가 바뀌게 되어, 운전점의 경로 위에서 접선벡터의 부호를 관찰함으로써 전압안정도 한계점을 탐색할 수 있다.

미소신호안정도 한계점의 탐색

운전점의 경로를 탐색하는 과정에서 미소신호안정도 제약에 따르는 한계점은 운전점의 경로에서 계통상태행렬의 최우측고유치를 계산하여 탐색하게 된다. 최우측고유치의 계산은 아놀디제비세프법을 이용하였다[5]. 이 방법은 부분고유치 계산시 기존의 방법에서 사용되던 선행변환 과정의 문제점을 개선하고 응용범위를 확장하기 위한 방안으로, 전력계통의 부분고유치 해석이론에서 지금까지 사용되었던 다른 방법들과는 다른 새로운 접근 방법으로 선행변환기법을 제비세프라는 다항식 필터로 대체

하는 방법을 이용하였다. 이것을 수정이늘디법에 적용하여 대규모 계통에서 최우측고유치를 계산할때 sparse 특성을 원형대로 보존하며, 한 번의 실행으로 원하는 최우측 고유치를 구하는 알고리즘이다.

향상된 PSTCP를 전체적으로 요약하여 그림 2에 나타내었다.

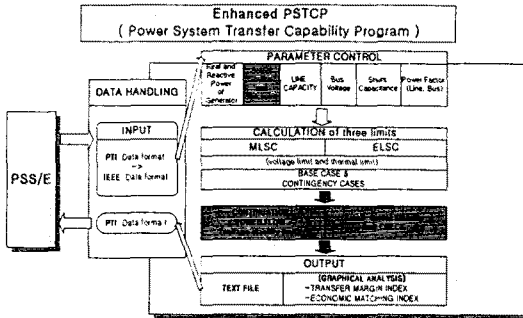


그림 2 TTC 계산 프로그램의 구성

4. 사례연구

본 절에서는 제안한 방법을 New England 39모선계통에 적용하여 순차적으로 TTC를 구하는 방법을 보이고자 한다. 모델계통은 10개의 발전기모선과 발전기모선의 부하를 제외한 17개의 부하모선으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 공급지역 2개, 부하지역 2개로 이루어진 총 4개 지역으로 나누어 지역간 전력전송을 가정하였다. 지역1과 지역3이 공급지역으로서 각각 5개의 발전기모선이 포함되어 있고 지역2와 지역4를 부하지역으로 설정하였다. 각 지역의 초기발전량 및 초기부하 등을 표 1에 정리하였다. 본 사례연구서 사용하게될 시나리오는 비동시 전송TTC가 되며, 이것은 대상 지역간 전송이 일어날 때 다른 지역의 전송은 없는 것으로 가정한 것이다.

New England 계통은 원래 안정도해석을 위해 만들어진 계통이므로 선로용량은 충분히 큰 값으로 하고 전압상한은 $\pm 10\%$ 로 하여 최적화를 수행하여 TTC를 계산해 보았다.

표 1. 모델계통의 지역정보

	발전기모선	부하모선	$P_{T0}(p=1.3)$	$P_{L0}(q=2.4)$
지역1	33,34,35,36,38		3,180[MW]	
지역2		15,16,21,26,27,28		1,549.4[MW]
지역3	1,30,32,37,39		3,013.56[MW]	
지역4		3,4,7,8,12,18		1,744.3[MW]

진하게 표시된 모선들은 증가시키지 않음

표2와 3은 TTC 계산결과를 보이고 있다. 여기서 TTC는 계통의 제약조건을 위반하지 않으면서 전원으로 부터 공급할 수 있는 부하의 최대량이 되며, 아래의 표에서는 모두 진하게 표시되어 있다. 표 2는 지역1에서 지역2로의 전력전송을 가정하였을 때의 TTC이며 3541[MW]로 산정되었다. 이때 24번 모선의 전압값이 하한값(0.9[pu])을 위반하고 있다. 표 3은 지역 3에서 지역 4로의 전력전송을 상정한 것이며 이때의 TTC는 3289[MW]이며 17번 모선의 전압이 하한값을 위반하고 있다.

표 2. 비동시 전송 TTC(AREA1=>AREA2)

지역	초기발전량	초기부하량	최종발전량	최종부하량	중요계약
1	3180		5329.3		전압하한(#26)
2		1549.4		3541.4	

표 3. 비동시 전송 TTC(AREA3=>AREA4)

지역	초기발전량	초기부하량	최종발전량	최종부하량	중요계약
3	3013.56		4764.3		전압하한(#18)
4		1744.3		3288.7	

전압상한한 제약을 $\pm 20\%$ 로 더 여유있게 가정하고 TTC를 계산한 결과가 표4와 5에서 보이고 있다. 표에서 알 수 있듯이 TTC는 증가하고 있지만 앞에서의 중요계약으로 나타났던 전압한계계약 대신 미소신호안정도 제약이 중요계약으로 나타나고 있다.

표 4. 비동시 전송 TTC(AREA1=>AREA2)

지역	초기발전량	초기부하량	최종발전량	최종부하량	중요계약
1	3180		5417.3		미소신호안정도
2		1549.4		3611.2	

* 한 쌍의 복소고유치의 실수부가 양이 됨

표 6. 비동시 전송 TTC(AREA3=>AREA4)

지역	초기발전량	초기부하량	최종발전량	최종부하량	중요계약
3	3013.56		5033		미소신호안정도
4		1744.3		3550	

* 한 쌍의 복소고유치의 실수부가 양이 됨

표 2-6에서 살펴본 바와 같이 비동시전송인 경우 TTC의 중요계약은 전력전송이 이루어지는 지역에서 발생하게 됨을 알 수 있다. 우리나라 전력계통과 같이 복잡하게 loop로 구성되어 있는 계통의 경우에는 제약경로와 실제의 조류경로가 상당히 차이가 날 가능성이 있으며, 추후 이러한 가능성에 대한 사례연구가 필요할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 계획단계에서 선로의 열용량, 전압상한한계약, 전압안정도 제약 및 미소신호안정도제약을 고려하는 송전허용용량(TTC)을 계산하는 알고리즘을 제안하였다. 개별 ATC제약을 고려하기 위한 서로 다른 수학적인 방법을 통합하여 순차적으로 각 계약의 위반여부를 판별하였으며, 알고리즘을 새로운 전력산업 구조환경에서 이용할 수 있도록 사용자편의를 위해 지역간 동시 및 비동시 전송을 고려한 TTC를 계산하도록 기능을 향상시켰다. 제안한 방법을 모델계통에 적용하여 TTC를 구해보고 계산된 값의 주요계약을 확인하였으며, 향후 과도안정도제약을 추가하는 연구를 진행할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] North American Electric Reliability Council, Available Transfer Capability Definition and Determination, June, 1996
- [2] Colorado Coordinated Planning Group, Northwest Regional Transmission Association, etc, "Determination of Available Transfer Capability within the Western Interconnection", February 18, 1997
- [3] 한국전력공사 연구보고서 제 96-2164호, 전력계통 수송능력 진단을 위한 평가지수 개발에 관한 연구, 1998 11.
- [4] 송화창, 이병준, 권세혁, "실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발", 대한전기학회 논문지 1999년 3월호.
- [5] 이병준, 김동명, "전력계통의 임계고유치 계산에 관한 연구 (아늘디체비세프법의 적용)", 대한전기학회 논문지 1998년 6월호.