

직류조류계산을 이용한 혼잡비용과 손실비용 평가

(Evaluation of Congestion Cost and Loss Cost using DC Load Flow)

배인수* · 송우창**

(In-Su Bae · Woo-Chang Song)

Abstract

Economics of available alternatives in the transmission planning are evaluated by the investment cost, loss cost and congestion cost. Congestion/loss cost is calculated in many years and many load levels by unit commitment of generators, optimal dispatch, load flow, judgement about transmission congestion and re-dispatch to reduce the congestion. The greatest difficulties to introduce variable optimization techniques on the transmission planning is the convergence of load flow. In this paper, economics in the transmission planning are evaluated using DC load flow, and case study is conducted on the Korea power system by proposed congestion/loss calculation methods.

Key Words : Congestion Cost, Loss Cost, DC Load Flow, Transmission Planning, Transmission Expansion

1. 서 론

국내 송변전설비 계획수립 절차에서는 전력조류, 고장전류, 과도안정도 등 기술성 검토를 통해 가용대안을 선정 후 경제성 평가로 대안별 우선순위를 결정한다. 경제성 검토 단계에서는 투자비용, 전력손실비용, 송전선로 혼잡비용(Congestion cost)을 산정하는데, 그 중 손실비용과 혼잡비용을 계산하기 위해서는 미래 계통에 대한 조류계산(Load flow)을 수행해야

한다. 손실비용의 경우는 피크부하 계통에 대한 조류계산 결과와 손실계수(Loss load factor)를 결합하여 연간 손실비용을 산정할 수 있다. 반면 혼잡비용의 경우는 모든 부하수준에 대해 혹은 피크부하 계통과 기저부하 계통 사이의 몇 단계 부하수준에 대해 계통분석을 수행해야 연간 혼잡비용을 계산할 수 있다. 또한 송변전설비 수명기간 동안의 다수 년도에 대한 계통분석이 필요하고, 각각의 계통분석 단계에서는 발전기 ON/OFF 상태를 결정하기 위한 발전기 기동정지계획(UC : Unit commitment), ON 상태 발전기의 유효전력 출력을 배분하기 위한 경제급전(Economic dispatch), 조류계산 후 계통혼잡 여부에 대한 판단, 혼잡해소를 위한 발전기 출력의 재급전 등의 과정을 거쳐야 한다.

계통계획 과정에서 가용대안을 대상으로 경제성을 평가하기 위해 선형계획법, 비선형계획법, 혼합정수계

* 교신저자 : 강원대학교 전기공학과 조교수
* Corresponding author : Kangwon National University, Department of Electrical Engineering
Tel : 033-570-6348, Fax : 033-574-7270
E-mail : wcsong@kangwon.ac.kr
접수일자 : 2012년 11월 9일
1차심사 : 2012년 11월 13일
심사완료 : 2012년 12월 4일

획법 등의 최적화 기법을 도입하는데 있어 의외의 가장 큰 난관은 실계통의 조류계산 수렴성 문제다[1]. 작은 규모의 전력계통을 대상으로 하는 사례연구에서는, 새로운 기법에 의한 결과를 계통에 적용하여 계통의 구조나 발전기 출력을 변경한 후에도 조류계산이 여전히 수렴하고, 혹 수렴하지 않더라도 무효전력이나 모션전압을 조정하여 조류계산을 수렴시킬 수 있다[2]. 그러나 국내 실계통과 같은 대규모 계통에서 PSS/E 등의 상용 조류계산 패키지를 사용하지 않고 조류계산을 수행하는 것은 상당한 어려운 작업이며, 조류계산이 완벽히 수렴하는 한국전력의 실계통 데이터를 보유하고 있다라도 그 계통을 수정한 후 조류계산이 수렴하지 않으면 연구자가 제시한 새로운 기법이 국내 실계통에 적합한지 판단할 수가 없다.

조류계산의 수렴성 문제를 해결할 수 있는 가장 좋은 방법은 PSS/E OPF 기능을 활용하는 것이다. PSS/E OPF에서는 전압위반 조건이나 무효전력 보상 장치 투입량을 변경하여 조류계산을 수렴시키는 기능을 보유하고 있다. PSS/E는 현재 실계통 조류계산을 위해 가장 널리 사용되는 프로그램이므로 PSS/E OPF 기능을 사용하는데 큰 어려움은 없다. 그러나 계통계획은 다수 년도에 대해, 그리고 1개 년도 안에서도 다수 부하수준에 대해 계통분석을 수행해야 한다. 또한 1개 부하수준 안에서도 여러 종류의 계통을 구성하여 계통분석을 수행해야 한다[3]. 상용패키지 안에 새로운 기법을 코딩하여 삽입하고자 한다면 그 프로그램에 대한 해박한 지식을 필요로 하고, 이를 피하고자 한다면 다수 프로그램을 병렬로 구동시키면서 프로그램 간에 데이터를 이동시켜야 하는 번거로움이 있다.

이에 본 논문에서는 조류계산의 수렴성 문제가 전혀 발생하지 않는 직류조류계산을 계통계획 경제성 평가에 도입하여 좀 더 신속하고 편리한 계통계획 수립이 가능하도록 하였으며, 국내 전력계통 환경에 적합한 손실비용과 혼잡비용 계산법을 제안하여 국내 실계통을 대상으로 그 결과를 확인하였다.

2. 직류조류계산

직류조류계산은 비선형 전력 방정식을 선형 모델로

근사화해서 해를 찾는 기법으로서, 반복계산 없이 역행렬의 행렬곱으로 해를 도출하기 때문에 계통계획이나 상정사고 해석시 계통상태 확인을 위해 널리 이용한다. 직류조류계산은 선로의 저항성분을 무시하고, 무효전력을 계산하지 않으며, 모션전압의 크기는 1 pu로 모든 모션에서 동일하다고 가정한다. 어드미턴스 행렬의 역행렬과 모선의 유효전력 열벡터의 행렬곱으로 모션전압 위상각을 구하며, 계산된 모션전압 위상각을 통해 선로에서의 전력손실과 선로의 유효전력 조류를 계산할 수 있다. 직류조류계산의 기본식은 다음과 같다[4].

$$[P] = [B][\theta] \quad (1)$$

$$[\theta] = [B]^{-1}[P] \quad (2)$$

여기서 $[P]$ 는 모선의 유효전력으로 구성된 열벡터, $[B]$ 는 선로의 리액턴스만 고려한 어드미턴스 행렬, $[\theta]$ 는 모션전압의 위상각으로 구성된 열벡터이다.

모션전압의 위상각을 구한 후 다음 식을 통해 선로의 유효전력 조류와 선로의 전력손실을 구한다.

$$P_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}(\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

$$P_{loss,ij} = R_{ij}P_{ij}^2 \quad (4)$$

여기서 x_{ij} 와 R_{ij} 는 각각 모선 i 와 모선 j 를 잇는 선로의 리액턴스와 저항, θ_i 는 모선 i 의 전압 위상각을 말한다.

3. 혼잡비용의 계산

비수도권에서 수도권으로의 복상조류가 허용용량을 초과하거나 전압 안정도를 위반하는 등 계통혼잡이 발생하는 경우 이를 해소하기 위해서 발전기 출력을 재조정해야 하고, 이 때 계통 전체의 발전비용이 증가한 만큼을 혼잡비용이라 한다[3]. 송변전설비 신설로 인해 계통혼잡이 완화된다면 재조정해야 할 발전기 출력이 상대적으로 작아지므로 혼잡비용은 감소하고,

이는 설비 신설로 인해 혼잡비용이 감소했다고 정량화할 수 있다.

혼잡비용을 계산하기 위해서는 혼잡이 발생하고 있는 계통(‘비계약계통’)의 총 발전비용과 혼잡이 해소된 계통(‘계약계통’)의 총 발전비용이 필요하다. 또한 설비 신설 전과 설비 신설 후를 비교해야 하므로 설비 신설 후의 계통에 대해서 다시 비계약계통의 발전비용과 계약계통의 발전비용을 계산해야 한다. 즉 설비 신설로 인한 ‘혼잡비용의 변동량’을 알기 위해서는 설비 신설 전후 각각에 대해 비계약계통, 계약계통을 분석해야 한다. 부하수준별 지속시간을 가중치로 하여 각 부하수준별 혼잡비용 변동량을 합산한 ‘연간 혼잡비용 변동량’은 식 (5)와 같다.

$$\Delta C_{con,j} = \sum_{l=1}^n \left[D_l \left\{ \begin{array}{l} C_{gen,l}^{new,con} - C_{gen,l}^{new,uncon} \\ - (C_{gen,l}^{old,con} - C_{gen,l}^{old,uncon}) \end{array} \right\} \right] \quad (5)$$

여기서 n 은 피크부하(부하수준 100%)부터 기저부하(부하수준 60%)까지의 연간 부하지속곡선을 부하 크기를 기준으로 구분한 개수다. D_l 은 연간 부하지속곡선에서 부하수준 l 이 차지하는 시간의 비율이고, $C_{gen,l}$ 은 부하수준 l 에서 계통 전체의 총 발전비용을 말한다. 계통 발전비용의 윗첨자 new 는 설비 신설 후 계통, 윗첨자 old 는 설비 신설 전의 기존 계통, 윗첨자 con 은 계통혼잡을 고려하지 않고 발전기 출력을 결정해서 계통혼잡이 발생한 비계약계통, $uncon$ 은 계통혼잡이 발생하지 않도록 발전기 출력을 재배분한 계약계통을 의미한다.

송변전설비를 신설하면 신설 전에 비해 비계약계통과 계약계통의 총 발전비용이 변하고, 이를 통해 혼잡비용의 변동량을 계산한다. 그런데 계통의 총 발전비용은 송전혼잡을 해소하는 과정에서 변하기도 하지만, 설비가 새롭게 추가되었으므로 계통의 전력손실도 변하여 총 발전비용에 영향을 준다. 결국 발전비용의 차이에는 전력손실 변동에 의한 영향이 일부 포함되어 있으므로, 전력손실 영향을 배제하기 위해서는 더 복잡한 혼잡비용 계산법이 필요하다. 그러나 직류조류계산을 적용할 경우, 조류계산에서 선로의 저항성분을 무시하므로 전력손실의 영향 없이 단순히 발전비용의

차이로 혼잡비용을 구할 수 있다.

4. 손실비용의 계산

비계약계통보다는 송전혼잡까지 고려한 계약계통이 실계통 상황과 더 유사하기 때문에, 혼잡비용을 구하기 위한 계약계통의 분석결과에서 손실비용을 도출할 수 있다. 연간 전력손실은 피크부하계통에서 구한 전력손실에 손실계수를 곱하면 그 값을 알 수 있다. 그러나 계약계통은 부하수준에 따라 계통분석 결과에서 큰 차이가 난다. 부하수준별로 발전기 출력이 서로 다르기 때문에 송전혼잡을 해소하기 위한 발전력 재분배도 부하수준별로 상이하고 결국 부하수준별로 계약계통의 전력손실도 상이하다. 따라서 계약계통 기준으로 손실비용을 구하기 위해서는 피크부하계통에 대한 분석 뿐만 아니라 기저부하까지 모든 부하수준에 대한 분석이 필요하다.

송변전설비 신설로 인한 부하수준별 ‘손실비용의 변동량’은, 설비 신설 전 계통에서의 전력손실과 설비 신설 후 계통에서의 전력손실 차이를 통해 전력손실 변동량을 구한 후 손실전력량의 단가(계통한계비용)를 곱해서 구한다. 현재 국내에서는 전력손실이 포함된 발전측 전력량을 예측하여 계통한계비용을 산정하므로 실제 손실전력량의 평균 단가는 계통한계비용보다 다소 작다. 반대로 수요측 전력량을 예측하여 계통한계비용을 산정할 경우는 손실전력량의 평균 단가가 계통한계비용보다 다소 높을 것이다. 그러나 실제 계산결과 손실전력량의 단가와 계통한계비용은 그 차이가 미비하므로 본 논문에서는 손실전력량의 단가로 계통한계비용을 사용하였다.

결국 송변전설비 신설로 인한 ‘연간 손실비용의 변동량’은 식 (6)과 같다.

$$\Delta C_{loss} = \sum_{l=1}^n \{ D_l (P_{loss,l}^{new,con} - P_{loss,l}^{old,con}) SMP_l \} \quad (6)$$

여기서 $P_{loss,l}$ 은 부하수준 l 에서 계통 전체의 전력손실, SMP_l 은 부하수준 l 에서의 계통한계비용을 말한다.

5. 직류조류계산과 경제성 평가

직류조류계산을 이용한 계통계획의 경제성 평가 순서도는 그림 1과 같다.

피크부하(부하수준 100%)에서 송변전설비 신설 전 비계약계통을 시작으로 부하수준 100% 신설 전 계약계통, 부하수준 100% 신설 후 비계약계통 순서로 부하수준 60% 신설 후 계약계통까지 총 20개의 계통분석을 진행한다. 단 비계약계통에서 송전혼잡이 발생하지 않으면 다음 단계의 계약계통 분석은 무시하고 진행한다.

수력발전기와 양수발전기는 부하수준별로 미리 정해놓은 출력을 계속 유지하는 반면, 화력발전기는 예비력 기준을 만족하도록 발전비용이 저렴한 순서로 계통에 병입된 후 경제급전에 의해 출력을 결정한다.

직류조류계산은 모선전압이 모두 1pu라고 가정하므로, 전압 안정도 분석은 불가능하다. 본 논문에서는 송전혼잡 중 비수도권에서 수도권으로 흐르는 북상선로의 용량제약을 고려하였으며, 직류조류계산을 통해 계산한 북상선로의 조류량과 제약량을 비교한다. 비계약계통은 북상선로 용량제약을 초과한 상태에서 계통분석을 수행하고, 계약계통은 수도권과 비수도권 사이에서 발전량을 재배분하고 경제급전을 다시 수행하는 반복과정을 거쳐 북상선로 조류량이 용량제약과 동일하도록 한다.

또한 계통한계비용을 산정하기 위해서, 식 (4)로 계산한 전력손실을 계통부하에 포함한 별도의 경제급전을 수행한다.

결국 부하수준, 신설 전/후, 비계약/계약계통 총 20개의 계통마다 경제급전 수렴을 위한 루프와 연계조류 수렴을 위한 루프가 존재하므로, 그림 1의 과정을 완료하기까지 많은 시간이 소요된다. 시작부터 종료까지 전 과정을 MATLAB으로 코딩한 경우에도 평균 2분 가량의 동작시간이 소요되며, 식 (2)의 [B]-1 역행렬을 구하는 별도의 함수를 도입할 경우는 평균 18분 가량 동작시간이 소요된다.

그림 1의 과정을 통해 최종적으로 도출한 결과값은 1개 년도 1개 대안에 대한 연간 손실비용 변동

량과 연간 혼잡비용 변동량이므로, 여러 대안을 대상으로 신설한 송변전설비의 수명기간 동안에 걸쳐 경제성을 평가하기 위해서는 반복적인 시뮬레이션이 필요하다.

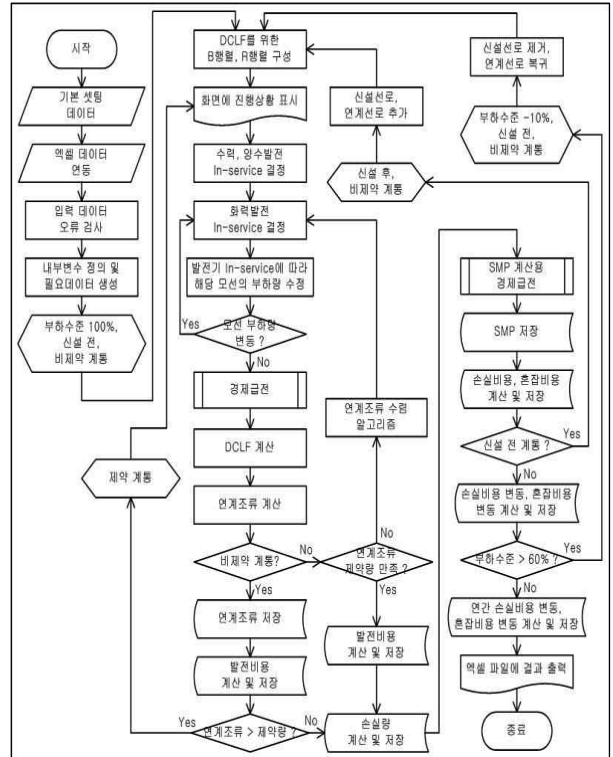


그림 1. 직류조류계산 계통계획 경제성 평가 순서도
Fig. 1. Flowchart of economic evaluation using DC load flow

6. 765kV 1회선 사례연구

직류조류계산을 이용한 계통계획의 경제성 평가 결과와 PSS/E OPF 패키지를 활용한 기존 경제성 평가 결과[5]를 비교하기 위해 신안성-신가평 간 765kV 1회선이 증설된 2018년을 사례연구 대상으로 선정하였으며, 사례연구의 파라미터는 참고문헌[5]를 참조하였다. 765kV 1회선 증설로 인해 비수도권에서 수도권으로의 북상선로 용량제약이 194MW 증가한 것으로 가정하였으며, 엑셀 파일로 작성한 입력 데이터와 연동되는 프로그램을 MATLAB으로 작성하여 사례연구를 수행하였다.

765kV 1회선 증설로 인한 시간당 혼잡비용 변동량과 시간당 손실비용 변동량을 2018년 각 부하수준별로 구하면 각각 표 1, 2와 같다.

표 1. 부하수준별 혼잡비용 변동량 (천원/시간)
Table 1. Congestion cost variance by load level (thousand won/hour)

부하수준	직류조류계산	PSS/E OPF
100%	-8,580	-14,893
90%	-9,626	-16,931
80%	-10,062	-16,324
70%	0	-3
60%	0	0

표 2. 부하수준별 손실비용 변동량 (천원/시간)
Table 2. Loss cost variance by load level (thousand won/hour)

부하수준	직류조류계산	PSS/E OPF
100%	-13,878	-11,461
90%	-7,434	-3,887
80%	-2,634	-1,928
70%	-623	-1,009
60%	-27	-73

2018년의 부하수준 70%, 60%에서는 송전혼잡이 발생하지 않으므로 혼잡비용이 없고, 결국 765kV 1회선 신설로 인해 북상선로 용량제약이 증가해도 혼잡비용의 변동 또한 없다. 반면 송전혼잡이 존재하는 부하수준에서는 설비 신설로 인해 혼잡비용이 감소하고 있다.

송전혼잡이 존재하는 부하수준에서는 전력손실을 제약계통을 기준으로 계산하였고, 송전혼잡이 존재하지 않는 부하수준에서는 제약계통과 비제약계통이 동일하므로 비제약계통을 기준으로 전력손실을 계산하였다. 설비 신설로 인한 손실비용 변동량을 보면,

부하수준이 100%에서 60%로 점차 감소할수록 전력 손실량 자체도 감소하고 계통한계비용도 감소하기 때문에 손실비용 변동량도 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.

시간당 비용 변동량에 부하수준별 지속시간을 곱해서 합산한 연간 혼잡비용 변동량과 연간 손실비용 변동량을 계산하면 표 3과 같다.

보다 정확한 PSS/E OPF의 결과에 의하면, 765kV 1회선 신설로 인해 연간 혼잡비용은 약 690억원 절감되고 연간 손실비용은 약 135억원 절감되는 것으로 평가된다. 반면 직류조류계산을 활용한 경제성 평가 결과에서는 연간 혼잡비용 절감액은 다소 작게, 연간 손실비용 절감액은 다소 크게 산출되는 결과를 보이고 있다.

표 3. 연간 혼잡/손실비용 변동량 (억원/년)
Table 3. Annual congestion/loss cost variance (hundred million won/year)

	연간 혼잡비용 변동량	연간 손실비용 변동량
직류조류계산	-417.2	-181.9
PSS/E OPF	-690.4	-134.6

7. 결 론

본 논문에서는 국내 전력계통 상황에 적합한 혼잡비용 산정방식과 손실비용 산정방식을 제시하였으며, 실계통을 대상으로 하는 계통계획 경제성 평가에 적용하기 위해 직류조류계산을 도입하였다. 또한, 신안성-신가평 765kV 1회선 신설에 관한 2018년 사례연구를 통해 PSS/E OPF 팩키지를 활용하는 경제성 평가기법과 본 논문에서 제시한 평가 기법의 계산결과를 비교하였다.

직류조류계산은 반복계산이 필요 없는 빠른 계산시간과 강력한 수렴성을 보장하지만, 무효전력과 모선전압의 크기를 무시하기 때문에 그 결과가 다소 부정확하다. 따라서 계통운용의 측면에서는 직류조류계산을 적용하기에 무리가 있지만, 불확실한 미래 계통을 모

의하는 계통계획 측면에서는 충분히 장점을 가진다. 또한 국내 실계통의 조류계산 비수렴성은 새로운 계획기법 도입의 장벽으로 작용하므로 대규모 계통에 대한 계통계획 절차에서 직류조류계산은 그 활용성이 충분하다 할 수 있다.

References

- [1] G.C.Oliveira, AP.C.Costa, S.Binato, "Large scale transmission network planning using optimization and heuristic techniques", IEEE Trans. on Power System, Vol 10, pp. 1828-1834, 1996.
- [2] R.Romero, A.Monticelli, "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning", IEEE Trans. on Power System, Vol. 9, pp. 373-380, 1994.
- [3] Hyun-II, In-Su Bae, Jin-O Kim, "Congestion and Loss Cost for the Market Participants", Trans. KIEE, Vol. 60, No. 11, pp. 2021-2027, 2011. 11.
- [4] Antonio Gomez-Exposito, Antonio J.Conejo, Claudio Canizares, Electric Energy Systems (Analysis and Operation), CRC Press, 2009.
- [5] A Study on Application and Development of Reliability Worth Assessment Technology for Optimal Transmission Planning, KEPCO Research Institute, 2012. 08.

◆ 저자소개 ◆



배인수 (裴引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2008년 ~ 현재 강원대학교 전기공학과 조교수.



송우창 (宋禹昌)

1966년 6월 15일생. 1990년 2월 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1992년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2010년 ~ 현재 강원대학교 전기공학과 조교수.