

상정사고를 고려한 분산처리 최적조류계산에 관한 연구

허 돈, 김진호, 박종근, 김발호*, 박종배**
 서울대학교 공과대학 전기공학부 *충의대학교 전기제어공학과 **안양대학교 전기전자공학과

A Study on the Distributed Security-Constrained Optimal Power Flow

Don Hur, Jin-Ho Kim, Jong-Keun Park, Balho H. Kim*, Jong-Bae Park**
 SoEE, Seoul National University *SoEE, Hong-ik University **Dep. of EE, Anyang University

Abstract - In this paper, we propose that the security-constrained optimal power flow (SCOPF) be solved in a decentralized framework, consisting of regions, using a price-based mechanism. We first solve the distributed OPF problem to determine the maximum secure simultaneous transfer capability of each tie-line between adjacent regions by taking only the security constraints imposed on the tie-lines into account. And then, the regional SCOPF is performed using the conventional LP approach. A description on the inclusion of security constraints with distributed OPF algorithm will be given, followed by a case study for Korea power system.

1. 서 론

최근 발전기술의 발달, 경쟁의 도입, 그리고 규제 완화와 같은 새로운 환경의 변화로 말미암아 전력계통은 좀 더 효율적인 운영을 필요로 하게 되었다. 이에 따라, 최적조류계산의 역할은 변모하고 있으며, 실시간 계산 및 데이터 통신의 중요성이 증대되고 있다. 이에 따라, 기존의 최적조류계산 모델에 안전도 제약조건을 추가해야 할 필요성이 증가하고 있으며, 최적조류계산의 해를 찾기 위한 알고리즘의 수렴속도를 향상시키려는 시도가 한창이다. 그러나, 최적조류계산에 안전도 제약조건을 추가하여 정식화하는 방법은 최적조류계산 알고리즘의 계산 과정에 많은 어려움을 증가시켰으며, 기존의 중앙 집중적인(centralized) 최적조류계산 모델은 이런 문제에 대해 한계점을 갖고 있다 [1]. 따라서, 빠른 수렴속도를 갖는 최적조류계산 알고리즘에 대한 연구가 진행되었으며, 그 결과 분산 연산장치를 이용하는 병렬처리방법이 대두되었다 [2,3].

본 논문에서는 기존의 분산·병렬처리 최적조류계산 모델에 안전도 제약조건을 추가하여 정식화하고 그 방법을 이용하여 우리나라의 실 계통에 적용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 안전도 제약조건에 대한 구형

SCOPF는 기존의 최적조류계산이 고려하던 계통의 일반적인 제약조건은 물론 발전기나 송전선의 사고와 같은 계통의 상정사고 제약조건까지 고려하여 계통의 상태를 결정하는 매우 중요한 도구가 되어오고 있다. 이러한 SCOPF의 해는 계통에 발전기 사고나 송전선 사고와 같은 주요한 외란이 발생하더라도 계통의 정상 상태를 유지할 수 있는 최소비용의 운전상태를 결정한다.

따라서 SCOPF에서는 계통의 다양한 운전 제약 조건들이 기존의 최적조류계산 문제에 추가되어 상정사

고 후의 조류나 전압과 같은 계통의 상태를 반영하게 된다. 즉, 고려하고자 하는 각 상정사고에 대하여, 상정사고 후의 변수들로 조류계산과 운전 제약 조건들을 상정사고 이전의 최적조류계산 문제에 포함시켜 정식화하여 상정사고 후의 계통 상태를 구현한다는 것으로, 이러한 작업은 문제를 매우 복잡하고 크게 만드는 경향이 있다. 그러나, 제약조건을 추가함으로써 발생하는 이러한 문제점들을 선형화를 통해서 해결할 수 있다.

기존의 최적조류계산 문제에 안전도 제약조건을 포함시키기 위해서, 기존 경우의 최적조류계산의 해와 상정사고 후 계통의 상태변수를 반복적으로 풀어가는 선형계획법을 사용하였다 [4,5]. 각 반복단계에서, 상정사고 후의 변수 값을 상정사고 전 기존 경우의 최적조류계산을 먼저 풀어 얻어진 해에 기초하여 결정되며, 상정사고 후 제약조건들도 이러한 기존 경우의 해에 기초하여 선형화된다. 그리고 이렇게 선형화된 상정사고 제약조건들이 기존 경우의 최적조류계산 문제에 추가된다.

2.2 상정사고를 고려한 분산처리 최적조류계산

연결 선로(tie-line)의 중요성을 충분히 인식하여, SCOPF 문제를 분산처리방법으로 푸는 방법을 다음과 같이 제안하고자 한다. 우선, 지역을 연결하고 있는 각 연결 선로의 안전한 최대 송전 용량을 결정하기 위해 각 연결 선로의 안전한 제약조건을 추가하여 최적조류계산 문제를 정식화하고 이를 푼다. 이러한 경우, 연결 선로의 사고는 발전기 사고로 등가화 할 수 있고, 추가된 안전도 제약 조건은 발전분포계수 (Generalized Generation Distribution Factor)와 선로사고분포계수 (Line Outage Distribution Factors)를 이용하여 정식화한다 [6,7,8]. 이와 같은 과정을 통해 각 연결 선로의 안전한 최대 송전 용량이 결정되면, 각 연결선로의 조류를 이 값으로 고정된 상태에서 각 지역별로 SCOPF를 푼다. 즉, 지역별 SCOPF를 풀 때, 각 연결 선로는 가상 발전기(dummy generator)로 등가화하고, 이러한 가상 발전기의 출력은 연결 선로의 최대 송전 용량으로 고정된 상태로 지역별 SCOPF를 푼다는 것이다. 그림 1에 본 논문에서 제안한 분산처리 SCOPF 방법이 정리되어 있다.

3. 사례 연구

3.1 사례 연구 대상 계통

본 연구에서는 사례 연구를 위해서 우리 나라 실 계통을 사용하였는데, 발전기와 송전선로 및 부하 데이터 등은 1998년을 기준으로 하였다. 우리 나라 계통 운용에 있어서 중요한 문제 중의 하나인 복상조류를 고려하기 위해, 복상선로를 우리 나라 계통의 연결 선로(tie-line)로 지정하고, 우리 나라 전 계통을 두 개의 지역, 즉 경인지역과 비경인지역으로 구분하였다. 본 연구에서 지정한 복상선로는 345kV의 경우, 5개의 선로

전계통에 대하여 상정사고를 고려하지 않은 분산처리 최적조류계산 문제를 푼다.

해가 수렴할 때까지 다음 과정을 반복한다.

{ 전 계통에 대하여 조류계산을 한다.
연결 선로의 민감도 계수 GGDF, LODF를 구한다.
연결 선로의 상정사고 제약조건이 반영된 분산처리 OPF를 각 지역별로 푼다.
지역간 해의 정보를 교환한다.

} 각 연결선로의 안전한 최대 송전용량을 얻는다.
해가 수렴할 때까지 다음 과정을 반복한다.

{ 각 지역별 계통에 대하여 조류계산을 한다.
지역 선로의 민감도 계수 GGDF, LODF를 구한다.
지역 선로의 상정사고 제약조건이 반영된 OPF를 지역별로 푼다.

} 각 지역별 SCOPF의 해를 얻는다.

그림 1. 분산처리 SCOPF 절차

(route)인데 3개 선로는 각 2회선(circuits)으로, 나머지 2개의 선로는 각 1회선으로 구성되어 있으며, 154kV의 경우, 8개 선로 17개 회선으로 이루어져 있다. 본 논문에서는 345kV 복상선로에 대해서 (N-1) 상정사고를 고려하였는데, 이 때 고려한 상정사고는 선로(route)에 대한 상정사고이며, 이를 통해 각 복상선로의 안전한 최대송전용량을 구하였다. 본 연구에서 사례 연구한 실계통 데이터는 표 1과 그림 2에, 복상선로 데이터는 표 2와 표 3에 정리되어 있다.

표 1. 계통 데이터

모선수	발전기수	선로수	부하[MW]
771	209	1507	34,459

표 2. 345kV 복상선로 데이터

번호	복상선로(345kV)	회선	용량[MW]
1	신제천-동서울	1	2192
		2	2192
2	청양-서서울	1	2192
		2	2192
3	청원-신용인	1	1096
		2	1096
4	아산-서서울	1	2192
5	화성-서서울	1	2192

최적화 프로그램으로는 GAMS 2.25 패키지[9]를 사용하였으며, 수렴조건으로는 두 지역 경계에서의 변수값(border variables)의 최대 차이를 선택하였는데, 유효전력과 무효전력의 최대차이는 10^{-3} , 전압크기와 위상각의 최대차이는 10^{-2} 을 수렴 기준으로 하였다.

3.2 사례 연구 결과

우선, 전력조류계산을 이용하여 345kV 복상선로의 민감도 계수를 구하였다. 345kV 복상선로의 민감도 계수는 표 4에 정리되어 있다. 다음으로, 345kV 복상선로의 상정사고를 고려한 OPF의 해를 구하여, 각 복상

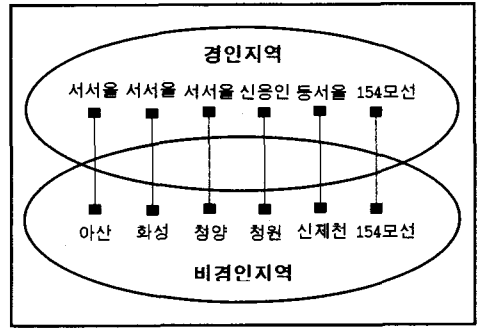


그림 2. 사례 연구 대상 계통

표 3. 154kV 복상선로 데이터

번호	복상선로(154kV)	회선	용량[MW]
6	덕소-청평HP	1	192
		2	192
		3	192
7	동서울-청평양수	1	445
		2	445
8	용인-안성	1	445
		2	445
9	평택-서천안	1	192
		2	192
10	이천-제천	1	159
		2	159
11	여주-문막	1	445
		2	445
12	감곡-음성	1	445
		2	445
13	송탄-안성	1	445
		2	445

표 4. 345kV 복상선로 민감도 계수

선로 사고 민감도	1	2	3	4	5
1	0.00000	0.01818	0.00079	0.09168	0.22610
2	0.12961	0.00000	0.24477	0.61881	0.13766
3	-0.01569	0.45158	0.00000	0.75480	-0.02748
4	0.18354	0.16283	0.10558	0.00000	0.20406
5	0.32058	0.02721	-0.00111	0.14965	0.00000

선로의 안전한 최대송전용량을 구하였다. 각 복상선로의 최대용량(MC, Maximum Capacity)과 안전한 최대송전용량(SMT, Secure Maximum Transfer)은 표 5에 정리되어 있으며, 상정사고를 고려하지 않은 경우의 복상선로의 조류(NF)도 함께 수록하였다.

표 5, 6, 7에 제시된 NF는 상정 사고를 고려하지 않고 우리 나라 계통 전체에 대해서 최적 조류계산(OPF)을 수행하였을 경우에 각 선로에 흐르는 유효전력을 나타낸 것이다. 표 5에 제시된 복상선로의 SMT는 표 4의 민감도 계수를 사용하여 상정 사고를 고려한 경우의 SCOPF를 풀었을 때의 각 선로에 흐르는 유효전력을 나타낸다. 그런데, 표 5의 SMT와 NF를 비교해보면 그 값에 큰 차이가 없음을 알 수 있는데, 이러한 결과는 현재 우리 나라의 복상선로의 이용률(각 선로의 최대 송전 용량에 비해서 각 선로에 흐르는 조류)이 비

표 5. 북상선로의 안전한 최대송전용량
(단위:MW)

선로 번호	MC	SMT	NF	선로 번호	MC	SMT	NF
1	2192	732.2	732.1	8	445	19.3	19.3
	2192	732.2	732.1		445	19.3	19.3
2	2192	534.3	534.3	9	192	12.4	12.4
	2192	534.3	534.3		192	12.4	12.4
3	1096	209.3	209.3	10	159	95.7	95.7
	1096	209.3	209.3		159	95.7	95.7
4	2192	848.8	848.8	11	445	19.0	19.0
	2192	580.8	580.8		445	19.0	19.0
6	192	99.2	99.2	12	445	51.1	51.1
	192	99.2	99.2		445	51.1	51.1
7	192	100.9	100.9	13	445	20.0	20.0
	445	200.0	200.0		445	20.0	20.0
	445	200.0	200.0				

MC : 최대용량

SMT : 안전한 최대송전용량

NF : 상정사고를 고려하지 않은 경우의 조류

표 6. 경인지역 주요선로 데이터 및 조류
(단위:MW)

번호	선로	회선	용량	SMT	NF
14	영서-서서울	1	1096	697.2	619.0
		2	1096	697.2	619.0
15	양주-서인천	1	2192	864.9	861.0
		2	2192	864.9	861.0
16	성동-미금	1	916	289.0	287.1
		2	916	289.0	287.1
17	신인천-신시흥	1	1096	269.9	100.6
18	신시흥-화성	1	2192	802.9	713.7

교적 낮기 때문에 북상선로 가운데 어떤 선로에서 사고가 발생하여 서비스 지장이 발생하더라도 나머지 선로에 미치는 영향이 크지 않다는 것이다.

표 6과 표 7에서는 경인지역과 비경인지역 주요 선로들에 대하여 북상선로에 대하여 했던 것처럼 각 선로의 민감도를 계산하여 상정사고를 고려한 OPF를 지역별로 수행하여 해당선로들의 SMT를 계산하였는데, 이러한 SMT는 각 지역의 발전력과 부하 분포에 영향 받는다는 것을 알 수 있다. 경인지역의 주요선로들은 북상선로의 경우처럼 선로 이용률이 비교적 낮고 근처에 발전력이 인접한 경우가 많지 않기 때문에 SMT와 NF 값의 차이가 그리 크게 다르지 않았지만, 표 7에서 보는 바와 같이 비경인지역 주요선로의 SMT 값은 비경인지역 주요선로들이 발전력과 인접해 있는 경우가 많고, 선로 이용률도 비교적 높기 때문에 NF 값과는 비교적 차이가 많은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상정사고를 고려한 분산 병렬 처리 OPF 구현에 대한 접근을 시도하였으며, 본 연구에서 제시한 방법은 대규모 연계 계통에 분산 처리 알고리즘을 적용할 수 있는 방법을 제시하였다.

분산 병렬 처리 SCOPF의 해를 구하기 위해 선형화 기법에 기초한 방법을 제안하였는데, 먼저 연결 선로(tie-line)의 안전한 운전에 초점을 맞추고 그리고 나서,

표 7. 비경인지역 주요선로 데이터 및 조류
(단위:MW)

번호	선로	회선	용량	SMT	NF
19	신남원-광양	1	1096	659.4	138.9
		2	1096	659.4	138.9
20	신포항-서대구	1	2192	646.7	248.0
		2	2192	646.7	248.0
21	북부산-신울산	1	1096	218.6	139.7
		2	1096	218.6	139.7
22	신영주-신제천	1	2192	475.4	36.4
		2	2192	475.4	36.4

각 지역에서 구현할 수 있는 SCOPF의 해에 대하여 각 지역별 SCOPF를 풀었다. 본 논문에서 제안한 기법을 우리 나라 실제 계통의 북상조류 문제에 적용하여 사례연구를 수행하였으며, 그 결과 북상선로의 안전한 송전용량(maximum secure transfer)을 얻었으며 우리 나라 계통을 경인지역과 비경인지역 2개 지역으로 구분하여 각 지역 주요 선로의 안전한 송전용량 역시 계산하였다.

본 논문에서 제안한 SCOPF 기법은 각 지역별 SCOPF의 해가 구현 가능하지 않은 경우(infeasible case)에 대해서는 아직까지는 고려하지 못하고 있다. 따라서, 지역별 SCOPF 해를 구현할 수 없는(infeasible) 경우에 대처할 수 있도록 상정 사고를 고려한 OPF 정식화 과정에 대한 좀 더 세밀한 연구가 필요하며, 또한 SCOPF의 해를 좀 더 효율적으로 그리고 안정성 있게 찾기 위한 노력이 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. Stott, O. Alsac, and A. J. Monticelli, "Security analysis and optimization," *Proceedings of the IEEE*, 75(12) : December 1987 pp. 1623 - 1644.
- [2] Balho Kim and Ross Baldick, "Coarse-grained distributed optimal power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp.932-939.
- [3] Ross Baldick, Balho H. Kim, Craig Chase, "A Fast Distributed Implementation of Optimal Power Flow," *IEEE/PES Summer Meeting*, San Diego, CA, 1998.
- [4] Ross Baldick, *Economic Operation of Power Systems. Lecture Notes in Electrical and Computer Engineering. The University of Texas at Austin*, 1995.
- [5] S.A. Farghal and M.A. Tantawy, "Fast technique for power system security assessment using sensitivity parameters of linear programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(5): May 1984, pp.946-952.
- [6] F.L. Alvarado, "Penalty factors from Newton's method," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 97(6): Nov/Dec 1978, pp.2031-2040.
- [7] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg. *Power Generation, Operation, and Control*, 2nd Edition, New York : Wiley, 1996.
- [8] W.Y. Ng, "Generalized generation distribution factors for power system security evaluations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(3): March 1981, pp.1001-1005.
- [9] GAMS User's Guide ver. 2.25.