

시변민감도를 반영한 On-Line SCOPF알고리즘 개발

신영균 김발호
홍익대학교

On-Line SCOPF Using the Time-varying Sensitivity

Young-Kyun. Shin Balho H. Kim
Hong-Ik University

Abstract - The recent movement to deregulated and competitive electricity market changes the role of Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) and increases the importance for real-time computation, communication, and on-line data control. As power systems tend to be operated more closely to their ultimate ratings, more rapid updates of telemetered data and faster solutions times are becoming necessary to better track the changes in systems.

This paper presents an on-line SCOPF application exploiting the state-of-art OPF tools and corresponding interfacing technologies. The significance of the proposed mechanism is demonstrated with a case study system.

1. 서 론

전세계적으로 전력산업의 구조개편이 진행되면서, 계통운용의 효율성에 대한 필요성이 증가하고, 요금산정 문제가 크게 대두되고 있는 실정에 따라 이러한 문제를 동시에 해결할 수 있는 핵심기술로서 최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)의 필요성은 더욱 부각되고 있다. 더불어, 전력산업 구조개편시 보다 경제적인 계통운용의 필요성과 다양한 전력거래의 복잡성에 의해 더욱 정교한 계통감시와 상태분석을 위한 기술이 필요하게 되었다. 오늘날, 컴퓨터 기술의 발달은 OPF의 실시간 적용을 가능하게 해 주어, 실질적인 계통운용수단으로 바뀔 때 따라 안전도를 추가적으로 고려한 SCOPF(Security Constrained OPF)의 실시간 구현이 가능하게 되었으며, 이는 위의 문제를 해결할 수 있는 고도의 기술로서 평가된다.

일반적으로 예비력을 고려한 안전도 기준(예비력)은 대상 전력계통의 특정 계통운용 조건아래에서 상정사고를 고려한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과로부터 결정된다. 이러한 시뮬레이션은 통상적으로 "off-line"으로 실행된다. 각 시뮬레이션은 전력계통(송전계통)에서의 하나의 "스냅-샷(snap-shot)"을 표현하며, 이는 관련 수 많은 요소들이 정해진 기준에 따라 어떤 값으로 결정되었을 때의 경우이다.

그러나, 수요 및 대상 전력계통(송전계통)의 상황은 실시간으로 시시각각 변화하며, 따라서 송전망의 안전도 또한 시시각각 변화한다. 이러한 이유 때문에, 대상 송전망의 운용에 있어서 유지해야 할 적정 안전도 및 신뢰도는 주기적으로 갱신되어야 한다. 또한, 실제 운용상의 일정 예비력은 off-line으로 계산된 값보다 높아질 수도 있고, 낮아질 수도 있다. 미래의 대상으로 이러한 시뮬레이션을 실시할 때에는 계통에서 가정한 상황에 대한 불확실성은 매우 커지게 된다. 그러나 통상적으로 시뮬레이션의 결과로부터 얻어지는 송전망의 안전도 값은 실제 계통운용 시의 값으로 인식되고 있다.

2. On-Line SCOPF의 필요성

오늘날, 전력산업은 규제완화의 완화, 경제체제로의 이행으로 큰 변화를 겪고 있는 가운데 송전망 운용의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 송전사업자에게 있어, 송전망 건설은 장기적이고, 가격위험에 많이 노출되는 사업이다. 따라서, 수익이 보장되지 않는다면 기존의 송전설비로써, 효율성을 극대화시키는 방안을 선택할 것이다. 즉, 신규송전설비에 대한 투자저해요인은, 신규투자보다는 단기적 계획이 가능한 기존설비의 효율적 사용을 선호하게 될 것이며, 이러한 이유로 송전선로는 더욱 좁아진 여유에 의해 운용될 것으로 예상된다.[4]

즉, 계통운용자는 이러한 문제점으로 인하여 송전망의 적정 안전도 혹은 신뢰도를 유지하지 못할 수 있으며, 송전선로가 일정 예비력을 갖지 못하고 수용할 수 있는 전송량보다 더 많은 전송량이 요구된다면, 송전선로의 혼잡문제가 발생하며, 이러한 혼잡문제는 신뢰도 약화뿐만 아니라, 경제적인 손실을 야기시킬 수 있다.

이러한 문제의 해결책으로써, 보다 정교한 실시간 계통감시와 선로의 일정예비력(송전예비력) 확보가 보장되어야 한다. 단, 지나친 안전도 및 신뢰도의 요구는 송전선로의 비효율적 운용과 급진 비용의 상승 등을 초래할 수 있기 때문에 매 시간마다 비용을 최소화하면서, 적정 안전도 및 신뢰도를 확보할 수 있는 방안이 검토되어야 한다.

계통운전에 있어 경제성보다 우선적으로 고려되어야 할 것이 적정 계통안전도(system security)를 유지하는 일이다. 계통안전도란 계통의 일부(발전설비, 송배전설비)가 돌발적인 사고에 의해 상실되었을 경우에도 계통이 계속 일정운전기준을 만족하면서 운전될 수 있는 정도를 말하는 것으로서, 계통의 운전기준을 나타내는 주요지수인 계통신뢰도(system reliability) 및 계통안정도(system stability)와 밀접한 관계가 있다.

발전계통의 경우, 일부발전설비의 고장으로 발전기가 운전정지되는 경우가 있을 수 있다. 이 경우, 순동예비력(spinnig reserve) 등과 같이 사전에 확보해 놓은 운전예비력을 이용하여, 계통주파수의 저하나 다른 부하에 영향을 주지 않고 계통을 계속 운전할 수 있다. 한편, 송전계통의 경우 태풍과 같은 자연 재해나 보호계전기(OCR 등)의 오동작 등으로 인해 일부 송전선이 계통으로부터 단절될 수 있다. 이러한 경우, 선로조류에 대한 적절한 감시체계가 이루어진다면, 다른 선로의 여유용량(송전예비력)을 이용하여 광역정전(Blackout)의 유발없이 기존의 부하를 감당할 수 있다. 전력계통은 이와 같은 하나의 선로 탈락으로 다른 선로에 과부하가 걸리지 않도록 운전되며, 특히, 연쇄적 붕괴를 초래하지 않도록 운전되고 있다. 대부분의 전력계통은 상시운전감시(monitoring) 체계를 갖추고 있으며 신뢰성 있는 방식으로 운전되고 있다. 계통안전도 유지를 위해 필요한 사항은 다음과 같이 3가지로 구분된다.

- ① System Monitoring (계통감시)
- ② Contingency Analysis (상정사고분석)

③ Security-constrained optimal power flow
(안전도제약 최적조류계산)

3. On-Line SCOPF의 구현

SCOPF란 상정사고(contingency)를 고려한 최적조류계산(OPF)으로서, 계통설비(발전설비 및 송배전설비)의 일부가 돌발적인 사고로 계통으로부터 이탈되었다도 일정기술수준을 만족하면서 계속 안정적으로 운전되도록 경제급전계획을 수립하는 과정을 말하며, 다음과 같이 정식화 된다.

$$\begin{aligned} \min f(X) & \quad (1) \\ \text{s. t } g(X) &= 0 & (2) \\ h(X) &\leq 0 \end{aligned}$$

여기서, 목적함수(1)는 여러 가지가 될 수 있으나, 본 연구에서는 발전비용으로 하였다. 또한, 제약조건(2)으로는 전력균형방정식, 전압크기, 전압위상각, 발전기의 유효, 무효전력에 대한 최대출력과 최소출력, 등이며, 안전도 제약조건으로서 본 연구에서는 선로민감도를 이용하였다. 전력계통문제는 대개 비선형문제로서 해의 수렴에 상당한 경험과 기술이 필요할 뿐만 아니라, 수천 가지의 가능성을 검토하는 데 있어서, 특히 그 결과가 실시간으로 요구되어지는 경우에 있어서 수학적으로 완벽한 모델을 적용하는 것은 계산속도나 계산량 면에서 볼 때, 현실적이지 못할 경우가 허다하다. 이 경우, 민감도계수를 활용하면 실무적으로 큰 오차 없이 신속한 계통해석을 수행할 수 있다.

SCOPF에 사용되는 민감도계수는 크게, ① 발전기와 발전기 사이의 상관관계, ② 발전기와 선로 사이의 상관관계, ③ 선로와 선로 사이의 상관관계로 구분된다. ①번의 경우는 발전력 재분배에 관련된 것이고, ②번은 발전력의 변화에 따른 선로조류의 변화를 나타내는 계수로서 본 연구에서는 ③만을 적용하였다.

이러한 민감도는 과거 선로이용률이 낮고, 상당한 예비력을 확보한 경우에는 안전도제약이 구속되지 않는 경우가 많아 그 변화의 영향이 크지 않다. 그러나, 구조개편 이후 계통이 안전도제약에 상당 부분 노출된다면, 민감도의 작은 변화도 그 영향이 매우 크게 작용할 수 있으며, 또한 계통부하의 변화가 심한 경우 민감도는 매 상황마다 크게 변화할 수 있기 때문에, 시시각각 변화하는 부하에 따른 민감도의 변화를 고려하지 않을 수 없다.

다음은 부하의 변화상태를 고려하여, 갱신된 민감도를 반영한 안전도 제약조건에 대해 설명한 것이다.

선로와 선로 사이의 상관관계를 나타내는 인자를 LDF(Line outage distribution factors: $d_{l,k}$)라고 하며, 다음 식과 같이 '선로 k 가 탈락할 경우 선로 l 이 받는 영향'으로 정의한다. [2]

$$d_{l,k}^t = \frac{\Delta f_l^t}{f_{k0}^{t-\epsilon}} \quad (3)$$

여기서,

$d_{l,k}^t$ = t 에서의 선로 민감도

Δf_l^t = t 에서의 선로 l 의 조류변화량 (MW)

$f_{k0}^{t-\epsilon}$ = 고장 전 ($t-\epsilon$)의 선로 k 의 조류량(MW)

따라서, 만약 선로고장 전, 선로 l 과 k 상에서의 조류량을 안다고 할 경우, 선로 k 가 고장으로 탈락된 후, 선로 l 에서의 조류량은 다음과 같이 계산된다.

$$f_l^t = f_{l0}^{t-\epsilon} + d_{l,k}^t f_{k0}^{t-\epsilon} \quad (4)$$

여기서,

$f_{l0}^{t-\epsilon}, f_{k0}^{t-\epsilon}$ = 고장 전 ($t-\epsilon$) 선로 l 과 k 의 조류량

f_l^t = 선로 k 탈락 후(t) 선로 l 의 조류량

결국 SCOPF란 모든 선로에 있어서 고장탈락 후의 조류량(f_l^t)이 해당 선로(송전선)의 용량을 초과하지 않도록 발전력을 배분(경제급전)하는 작업을 말한다.

한편, 이와 같이 모든 선로에 대하여 $N-1$ 상정사고기준을 적용할 경우, 계산량이 기하급수적으로 늘어나 수학적으로 해를 얻기가 거의 불가능하거나 설명 해를 얻을 수 있는 경우라 하더라도 계산시간의 문제로 인해 실제 계통적용상 많은 어려움을 수반하게 된다. 예를 들어, 선로의 개수가 n 인 전력계통의 경우, 일반 OPF에서는 $2n$ 개의 선로제약조건이면 되나 $N-1$ 상정사고 SCOPF의 경우, $2n(n-1)$ 의 선로제약조건이 필요하게 된다. 따라서, 실무적으로는 모든 선로에 이러한 Security 기준을 적용하지 않고, Security가 문제될 가능성이 있는 경우를 먼저 선별하고(이를 contingency selection 이라 한다), 그 다음 이러한 경우들만 제약조건에 포함시켜 SCOPF를 수행하게 된다.

4. On-Line SCOPF Algorithm

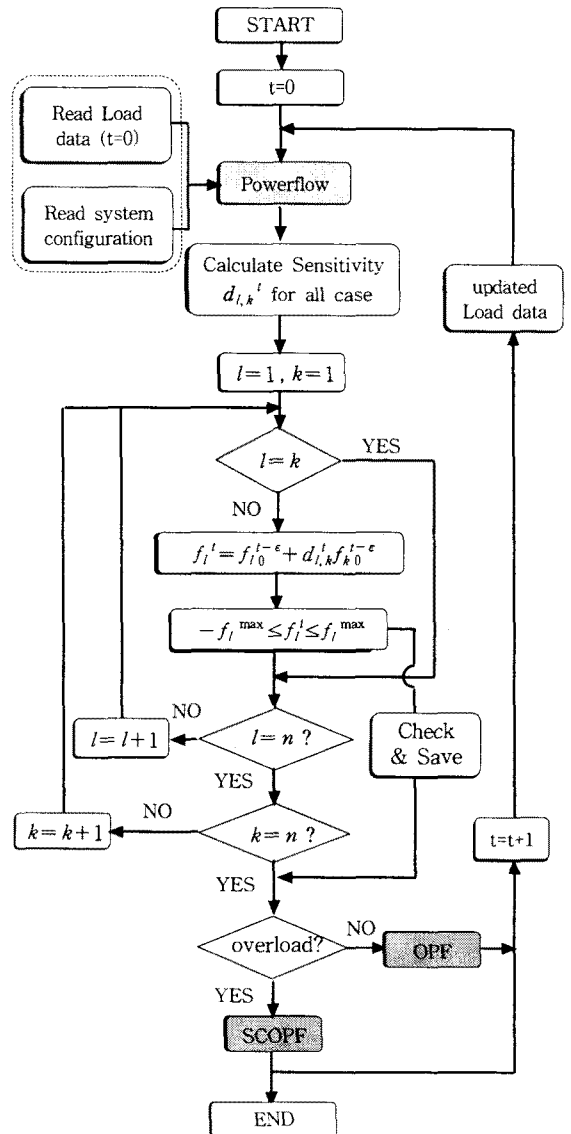


그림 1. On-Line SCOPF 흐름도

그림 1은 On-Line SCOPF의 흐름도를 보여주고 있다. 먼저, 임의의 시간에 관찰된 초기 부하데이터와 기타 계통조건(초기 모션전압 및 위상각, 발전기 출력제약, 선로정수 등의 초기값)을 읽어들이고, 전력조류계산으로부터 민감도를 얻어낸다. 민감도를 반영한 새로운 선로조류가 해당선로의 용량에 과부하를 야기시키는지를 검사(안전도 제약 구속여부 결정)하여, 안전도 제약에 구속되면 SCOPF를 풀게된다. 그러나 구속되지 않는다면(일반적으로 경부하시) 굳이 안전도제약조건으로 인해 해의 수렴속도를 저해할 필요가 없으므로 OPF를 풀게 된다. 이는 해의 도출시간 간격에 따라 지속적으로 변화된 부하데이터를 받아들여 민감도를 갱신시키게 되며, 이를 통해 반복적으로 SCOPF를 수행하게 된다.

5. 사례 연구

본 사례연구에서는 최적화 프로그램 GAMS의 내장모듈인 CONOPT를 이용하여, 안전도 제약을 고려한 SCOPF를 수행하였으며, 대상 계통은 편의상 2기 5도선 계통을 이용하였다.(부록 1,2 참조)

본 연구의 목적상 지속적으로 갱신된 민감도(가장 최근의 민감도)를 반영한 SCOPF의 결과와 과거의 민감도를 반영한 SCOPF의 결과를 비교하기 위해 다음과 같은 부하의 변동상황하에서 3개의 시간대(t=04, 10, 14)에 대한 유효전력의 민감도를 비교하였으며, 이 때의 주요 상정사고로서 L1(1), L3(2), L4(3)를 선택하였다.

표. 1 민감도 (t=04, 계통부하=165MW)

$d_{l,k}$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
$l=1$	-	-0.28269	0.05844
$l=2$	-0.38136	-	0.44805
$l=3$	-0.31356	0.44523	-

표. 2 민감도 (t=10, 계통부하=200MW)

$d_{l,k}$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
$l=1$	-	-0.29073	-0.23364
$l=2$	-0.19718	-	0.45794
$l=3$	-0.14286	0.45363	-

표. 3 민감도 (t=14, 계통부하=225MW)

$d_{l,k}$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
$l=1$	-	-0.28836	-0.22864
$l=2$	-0.36534	-	0.45477
$l=3$	-0.29645	0.45238	-

표. 4 SCOPF 수행결과 발전비용 비교

	Load(t=04)	Load(t=10)	Load(t=14)
LDF(t=04)	2288.767	2911.481	3220.204
LDF(t=10)		2907.169	3227.815
LDF(t=14)			3226.699

표. 5에서 최근 시간대에 측정된 LDF를 반영한 발전비용과 과거 시간대의 LDF를 반영한 발전비용에는 차

이가 있으며, 이는 최근 시간대에 계산된 LDF를 반영하는 것이 올바른 안전도를 반영하는 것임을 보여준다.

6. 결론 및 향후연구과제

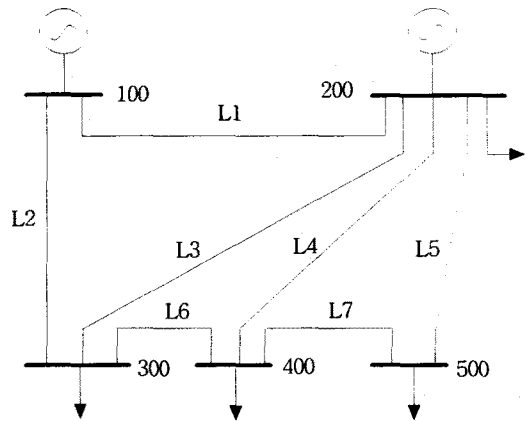
본 논문에서는 상정사고를 고려한 SCOPF의 구현에 있어서, 민감도를 대상 부하의 변동에 대응하여 시간의 함수로 반영하였고, 그 적용 알고리즘을 구현해 보았다. 즉, 해당 시간, 해당 부하를 반영한 On-Line SCOPF와 과거의 민감도 적용을 통한 SCOPF와의 결과를 비교해 봄으로써 그 결과가 다르게 나타남을 확인하였다.

향후, 실시간으로 구현되는 알고리즘에 선로민감도 뿐 아니라, 발전기와 선로간의 상관관계를 고려한 민감도를 추가적으로 반영한 알고리즘의 제시가 필요하다 하겠다.

[참고 문헌]

- [1] Marija Ilic, Francisco Galiana, Lester Fink "Power System Restructuring:Engineering Economics" Kluwer Academic Publishers, pp15~107, 1998.
- [2] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg "Power Generation, Operation, and Control" 2nd Ed. A Wiley-Interscience Publication, pp410~452, 1996.
- [3] "계통운영상의 적정 송전능력 산정에 관한 연구" 한국전력공사 계통운영처, 2000.1.
- [4] "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구" 한국전력공사 계통운영처, 1999. 8.
- [5] Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus. GAMS User's Guide. The Scientific Press, Redwood City, CA, 1990.
- [6] Wai Y. Ng, "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No 3, March 1981.

부록 1. 사례연구 모의 계통



부록 2. 선로정수 및 선로용량

line	BUS		R	X	B	line Capacity (MW)
	I	J				
L1	100	200	0.02	0.06	0.030	120
L2	100	300	0.08	0.24	0.025	100
L3	200	300	0.06	0.18	0.020	50
L4	200	400	0.06	0.18	0.020	50
L5	200	500	0.04	0.12	0.015	100
L6	300	400	0.01	0.03	0.010	40
L7	400	500	0.08	0.24	0.025	20