2006년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2006.11.3~4)

위험도기반 최적송전확장계획

손민균* 김동민* 김진오*
*한양대학교 전기공학과

Risk-based Optimal Transmission Expansion Planning

Min-Kyun Son* Dong-Min Kim* Jin-O Kim*
*Dept. of EE. Hanyang University

Abstract - In competitive market, it is important to establish a plan of transmission expansion considering uncertainty of future generation and load behavior. For this reason, revised transmission expansion model is proposed in this paper. In the proposed model, information of predictable future condition are included in a cost function of transmission expansion investment. Also, to reduce risk of the investment, mean-variance Markowitz approach is added to the objective function of cost. By optimization programming, the most robust and the minimum cost plan can be obtained.

1. 서 론

송전확장계획에 있어 중요한 점은 미래에 발생될 수 있는 상황을 고려하여 최소비용으로 불확실한 미래상황에 대한 위험도를 최소화하는 것이다. 본 논문에서는 미래에 발생될 상황과 그에 따른 확률을 고려하여 부하삭감이 발생하지 않도록 송전을 수행하였을 경우 발생되는 선로의 위험도 비용을 산출하여 송전확장비용과 송전선로의 위험도비용을 최소화시킬 수 있는 방안을 제시한다. 또한, mean-variance Markowitz 방법을 이용하여 미래상황에 대한 투자비용의 분산(표준편차)를 최소화시키는 방법이 추가된다.

2. 본 론

2.1 Stochastic Model

Stochastic Model의 목적은 미래에 발생될 수 있는 여러 가지 상황에 대해 최적의 송전확장방안을 얻는 것이다. 최적의 송전확장방안을 찾는데 있어 전략은 모든 부하의 부하삭감이 zero가 되도록 송전을 수행한 후 각 선로의 선로용량 제약조건의 위반정도를 살펴보는 것이다. 선로 용량 제약조건의 위반은 선로에 악영향을 끼치게 되어 선로를 새로 추가하거나 수리, 교체 비용을 발생시키므로 송전선로 설치비용과 더불어 금전비용으로 나타낼 수 있다.

또한, 각 발생될 미래에 대한 확률을 안다면 어떤 한 가지의 송전확장계획에 의해 발생되는 선로용량 제약조건 위반에 따른 위험비용의 기대값을 구할 수 있다.

Stochastic Model은 송전선로 추가비용과 선로용량 제약조건 위반에 따른 위험비용의 기대값의 합을 최소화하는 최적의 대안을 찾는 방법이다.

$$\min \sum_{(i,j)} c_{i,j} n_{i,j} + \sum_{k,(i,j)} p_k \cdot \alpha \cdot c_{i,j} \cdot r_{k,(i,j)} \qquad (1)$$

$$\text{Subject to } \; Sf_k + g_k = d_k,\ \forall k \qquad (2)$$
$$f_{k,i,j} - \gamma_{i,j}(n_{i,j}^0 + n_{i,j})(\theta_{k,i} - \theta_{k,j}) = 0,\ \forall k \qquad (3)$$
$$0 \le n_{i,j} \le \overline{n_{i,j}} \qquad (4)$$
$$\Omega \subset N \qquad (5)$$
$$i,j \in \Omega,\ k \in K \qquad (6)$$

여기서,
N : 모든 노드의 집합
Ω : 송전선이 새로 건설될 수 있는 양 노드에 대한 집합
K : 모든 가능한 미래상황에 대한 집합
$c_{i,j}$: 노드 i와 j사이의 송전선 부지에 추가될 수 있는 선로 하나당 설치비용
$n_{i,j}$: 노드 i와 j사이의 송전선 부지에 추가되는 선로의 개수
S : node-branch incidence matrix
f_k : 미래상황 k의 power flow vector
g_k : 미래상황 k의 generation vector
d_k : 미래상황 k의 demand vector
$f_{k,i,j}$: 미래상황 k에 노드 i와 j사이의 power flow
$\gamma_{i,j}$: 노드 i와 j사이의 susceptance
$n_{i,j}^0$: base case에 노드 i와 j사이의 선로의 개수
$\theta_{k,i}, \theta_{k,j}$: 미래상황 k에 bus i와 j의 nodal angle
$\overline{f_{i,j}}$: 노드 i와 j사이의 maximum power flow 허용량
$\underline{g}, \overline{g}$: minimum, maximum generation level vector
$\overline{n_{i,j}}$: 노드 i와 j사이의 송전선 부지에 설치될 수 있는 선로의 최대 개수
$r_{k,i,j}$: 미래상황 k에 노드 i와 j사이의 선로의 FOR(Forced Outage Rate)
α : 선로의 위험도 비용에 대한 페널티 인자
$(i,j)'$: 송전확장계획을 통해 새로 설치되는 노드 i와 j 사이의 송전선의 집합
(i,j) : 기존에 존재하는 선로와 새로 설치 혹은 기존선로에 추가되는 선로를 모두 포함하는 노드 i와 j사이의 송전선의 집합

2.1.1 선로의 위험도 비용

선로조류가 선로의 용량(제약조건)을 위반(초과)하는 경우는 다음과 같다.

$$f_{k,i,j} \ge (n_{i,j}^0 + n_{i,j})\overline{f_{i,j}},\ \forall k$$
$$-f_{k,i,j} \le (n_{i,j}^0 + n_{i,j})\overline{f_{i,j}},\ \forall k \qquad (6)$$

일반적인 상정사고 기준에서 선로의 조류량이 선로용량의 150% 이상일 때 선로는 고장이 발생하여 교체하여야 한다. 따라서 선로의 조류가 선로용량의 150%일 때 선로의 FOR(Forced Outage Rate)를 1로 가정한다. 또한 선로의 조류가 선로의 제약조건을 위반하지 않더라도 FOR이 존재하므로 그 경우에는 0.01을 FOR로 하고, 조

류가 선로용량의 100%이상 150%미만일 때, FOR은 0.01보다 크고 1보다 작은 범위에서 위반양의 비율에 따라 증가하는 지수함수값으로 가정한다. 본 논문에서는 지수함수를 $10e^{x-0.5}$로 가정하였다.

따라서 목적함수의 $r_{k.i.j}$는 다음으로 결정된다.

$$x=\frac{\text{선로조류량}}{\text{선로용량}} \quad (7), \qquad r_{k.i.j}=FOR=\begin{cases}0.01 & (x<1)\\ 10e^{0.5-x} & (1\le x<1.5)\\ 1 & (x\ge 1.5)\end{cases} \quad (8)$$

FOR이 1이 될 경우, 선로가 고장이 나서 교체를 해야 하는 상황이 되고, 선로의 설치비용 $c_{i,j}$이 발생한다. 따라서 이 논문에서는 각 선로의 FOR과 선로설치비용을 곱하여 선로의 위험도 비용을 산출한다. 선로의 위험도 비용을 산출하는 데 있어 기존에 존재하는 선로와 송전계획에 의해 새로 설치 혹은 기존의 선로에 추가되는 선로의 위험도를 모두 포함하여 계산한다.

α는 선로의 위험도 비용에 대한 페널티 인자로서 일반적으로 송전계획에 의한 송전선로 설치비용보다 선로의 FOR에 의해 고장이 발생되어 비상상황에서 재설치가 수행될 경우의 비용이 더 많이 들어가는 상황을 고려한 것이다. 따라서 α는 1보다 큰 값으로 실제 선로 교체 상황을 고려하여 정해진다.

2.2 Stochastic Model With Variance

2.2.1 Mean-variance Markowitz theory

Harry M. Markowitz는 고정된 기대이익에 대해 이익의 분산을 최소화시키는 최소 분산 포트폴리오 이론을 투자론의 한 방법으로 제시하였다. 최소 분산 방법은 투자과정에서 발생될 수 있는 편차를 위험인자로 고려하여 위험도를 최소화시키는 방법[1]이다. 목적함수에서 투자의 위험도를 고려하기 위해 위험도 인자와 표준편차가 포함된다.

$$\min\ f(x)+E\{f(y)\}+\theta\sqrt{Var\{f(y)\}} \qquad (9)$$

$f(x)$는 first-stage decision, $E\{f(y)\}$는 second-stage decision의 기대값, $\sqrt{Var\{f(y)\}}$는 second-stage decision의 표준편차이다. θ는 표준편차에 대한 위험도의 페널티 인자이다.

송전확장문제에 있어 송전확장에 대한 투자비용과 선로의 위험도 비용의 기대값, 선로 위험도 비용의 분산을 최소화하는 데 목적이 있다. 송전계획자는 분산을 최소화하는 데 관심이 있다면 θ에 0이 아닌 양의 값을 부여하여 분산을 최소화하면서 전체비용을 최소화하는 대안을 최적화과정을 통해 찾게 된다.

$$z=\sum_{i,j}\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{i,j} \qquad (10)$$

이면, 선로 위험도 비용의 기대값은,

$$\begin{aligned}E\{z\}&=\sum_k p_k z_k\\ &=\sum_k p_k\Big(\sum_{i,j}\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{i,j}\Big)\\ &=\sum_{k,(i,j)}p_k\cdot\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{k,(i,j)}\end{aligned} \qquad (11)$$

z의 분산은,

$$\begin{aligned}\sigma^2&=E\{z^2\}-E^2\{z\}\\ &=\sum_k p_k\Big(\sum_{i,j}\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{i,j}\Big)^2-\Big(\sum_{k,(i,j)}p_k\cdot\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{k,(i,j)}\Big)^2\end{aligned} \qquad (12)$$

분산과 분산(표준편차)에 대한 위험도의 페널티 인자 θ를 포함시킨 stochastic model은,

$$\min\ \sum_{(i,j)}c_{i,j}n_{i,j}+\sum_{k,(i,j)}p_k\cdot\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{k,(i,j)}$$
$$+\theta\Big(\sum_k p_k\Big(\sum_{i,j}\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{k,(i,j)}\Big)^2-\Big(\sum_{k,(i,j)}p_k\cdot\alpha\cdot c_{i,j}\cdot r_{k,(i,j)}\Big)^2\Big)^{\frac{1}{2}} \qquad (13)$$

Subject to $Sf_k+g_k=d_k,\ \forall k$ (14)

$f_{k.i.j}-\gamma_{i.j}(\underline{n^0_{i.j}}+n_{i,j})(\theta_{k.i}-\theta_{k,j})=0,\ \forall k$ (15)

$0\le n_{i,j}\le \overline{n_{i,j}}$ (16)

$\Omega\subset N$ (17)

$i,j\in\Omega,\ k\in K$ (18)

2.3 Case Study

송전망의 확장을 계획할 때, 송전계획자는 송전망의 확장을 결정하는 데 있어 어려움이 존재한다. 부하량이 미래에 대해 상당히 불확실하므로, 주로 높은 투자비용을 유발하는 최악의 경우를 고려하여 계획을 수립한다. 송전확장계획문제에서 가능한 한 투자비용을 최소화시키면서 부하의 가능한 모든 경우를 만족시키는 것이 중요하다.

확장계획의 모의를 위해 그림 1에 나타나 있는 Garver가 제안한 test system[3]을 사용하였다.

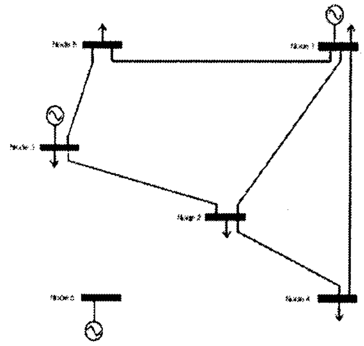

그림 1. Garver's 6-node system

그림 1의 base case에 대한 existing line의 정보는 표 1과 같다.

표 1. Existing Line Data
(* in p.u. 100MVA base; ** in MW; *** in $M.)

From	To	R*	X*	Capacity**	Investment Cost***
1	2	0.10	0.40	100	4.0
1	4	0.15	0.60	80	5.6
1	5	0.05	0.20	100	2.25
2	3	0.05	0.20	100	2.25
2	4	0.10	0.40	100	4.0
3	5	0.05	0.20	100	2.25

표 2에는 노드 2과 6, 노드 4과 6사이에 base case에서는 존재하지 않지만 송전확장계획에 의해 설치될 수 있는 송전선로에 대한 정보가 나타나 있다. 따라서 송전계획자는 표 1의 기존선로에 동일한 선로를 추가하거나 표 2의 선로를 새롭게 설치할 수 있다.

표 2. Non-Existing Line Data
(* in p.u. 100MVA base; ** in MW; *** in $M.)

From	To	R*	X*	Capacity**	Investment Cost***
2	6	0.075	0.30	100	3.0
4	6	0.080	0.30	100	3.0

Case Study에서는 5가지 서로 다른 미래가 송전계통에 발생된다고 가정한다. 미래는 각 노드의 발전양과 부하량에 의해 결정되는 데 송전확장계획자는 수집한 과거 계통 데이터를 가지고 미래의 상황을 예측한다. 5가지 미래 중, future1과 future5는 0.1의 확률, future2와 future4는 0.2의 확률, future3는 0.4의 확률로 발생한다고 가정한다. 5가지 미래에 대한 발전양과 부하량 정보는 표 3과 표 4에 주어진다. 각 미래에 대해 모든 노드의 발전양의 합과 부하량의 합은 동일하다.

표 3. 미래의 발전양 데이터(MW)

node	future1	future2	future3	future4	future5
1	82	64	50	69	73
3	272	212	165	227	240
6	896	699	545	749	792

표 4. 미래의 부하량 데이터(MW)

node	future1	future2	future3	future4	future5
1	360	255	80	205	30
2	50	110	240	215	380
3	195	20	40	350	245
4	265	370	160	40	215
5	380	110	240	215	50
6	0	110	0	20	185

Stochastic Model과 비교하기 위해 확률을 고려하지 않고 각 미래에 대한 최소비용(송전선로 추가비용+선로위험도비용) 송전확장계획(표 5)을 찾아보았다.

표 5. 각 미래에 대한 송전선로 추가 최적화방안

선로(from-to)	1-2	1-4	1-5	2-3	2-4	3-5	2-6	4-6
future1	2	0	0	2	2	3	1	0
future2	0	1	0	0	0	1	0	1
future3	0	0	0	0	1	2	1	0
future4	0	0	0	3	0	2	1	0
future5	0	0	0	0	1	0	1	0

표 6은 표 5의 각 대안들을 확률을 고려한 Stochastic 모델(식 (1))에 적용하여 비용을 산출한 결과와 식 (1)의 최적대안 결과(표 7)를 비교한 것이다.

표 6. 각 미래를 식 (1)에 적용하여 비용 산출

미래	선로추가비용	선로의 기대위험도비용
future1	30.25 $M	58.948 $M
future2	10.85 $M	207.870 $M
future3	11.50 $M	83.501 $M
future4	14.25 $M	130.790 $M
future5	7.00 $M	59.067 $M
식 (1) 최적대안	32.00 $M	11.817 $M

표 6의 결과를 보면, 각 미래에 대한 최적 대안들로 5가지 미래를 고려하여 선로의 기대위험도비용을 산출하면 식 (1)의 최적대안보다 선로추가비용은 낮지만 선로의 기대위험도 비용은 식 (1) 최적대안에 대한 선로추가비용의 절약비용보다 훨씬 크게 나타난다. 따라서 선로추가비용과 선로의 기대위험도비용을 합한 전체비용을 비교해보면 하나의 미래만 고려하여 송전확장계획을 수행하는 것보다 여러 미래에 대한 비용의 기대값을 구하여 전체비용을 최소화시키는 대안을 선택하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

표 7, 8는 목적함수 (13)이 최소화되는 경우의 결과이다. 결과는 θ를 0으로 했을 때와 1로 했을 때, 목적함수 (13)을 최소화시키는 해를 찾은 것이다.

표 7. θ가 0일 때의 (13)식의 최적해 방안((1)식의 결과와 동일)

선로(from-to)	1-2	1-4	1-5	2-3	2-4	3-5	2-6	4-6
추가선로개수	2	0	0	3	3	1	1	0
선로추가비용	선로의 기대 위험도비용				선로의 위험도비용의 표준편차			
32 $M	11.817 $M				4.0095 $M			

표 8. θ가 1일 때의 (13)식의 최적해 방안

선로(from-to)	1-2	1-4	1-5	2-3	2-4	3-5	2-6	4-6
추가선로개수	2	0	0	2	3	3	1	0
선로추가비용	선로의 기대 위험도비용				선로의 위험도비용의 표준편차			
34.25 $M	10.548 $M				0 $M			

θ를 0으로 했을 때와 1로 했을 때의 최적방안을 비교하면 θ를 0으로 했을 때, 선로추가비용과 선로의 기대위험도 비용의 합, 즉 전체비용은 가장 낮지만 θ를 1로 했을 때의 대안에 비해 선로의 위험도 비용에 대한 표준편차가 높다. θ를 0으로 했을 때의 대안은 전체비용이 θ를 1로 했을 때보다 0.981 $M만큼 절약할 수 있지만 표준편차가 4.0095 $M로서 절약된 비용보다 표준편차에 의해 발생될 수 있는 비용이 크므로 비용의 표준편차에 의한 위험도를 피하고자 하는 송전계획자의 입장에서는 θ를 1로 했을 때의 대안이 더 낫다고 볼 수 있다. 이 경우는 θ를 0으로 했을 때의 대안이 어떤 미래에 채택되었을 경우 표준편차에 의해 4.0095 $M만큼의 비용이 대안의 기대값에 비해 더 크게 발생한다면 θ를 1로 했을 때의 대안이 3.0285 $M만큼 절약될 수 있다.

3. 결 론

송전확장계획에 있어 중요한 점은 미래에 발생될 수 있는 상황을 고려하여 최소비용으로 불확실한 미래상황에 대한 위험도를 최소화하는 것이다. 이 논문에서는 미래에 발생될 상황과 그에 따른 확률을 고려하여 부하삭감이 발생하지 않도록 송전을 수행하였을 경우 발생되는 선로의 위험도 비용을 산출하여 송전확장비용과 송전선로의 위험도비용을 최소화시킬 수 있는 model을 제시하고, mean-variance Markowitz 방법을 이용하여 미래상황에 대한 투자비용의 표준편차를 최소화시키는 방법이 추가되었다. 사례연구 결과 제안한 model을 통해 다양한 미래를 고려하여 발생될 수 있는 비용의 기대값을 산출하여 전체비용을 최소화시키는 효과적인 대안을 찾을 수 있었고 전체비용을 최소화시키는 해를 찾는 과정에서 분산(표준편차)을 최소화시키는 페널티 인자를 목적함수에 포함시킴으로서 약간의 비용증가가 있었지만 비용의 편차를 최소화시켜 투자의 위험도를 최소화시키는 방안을 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Juan Alvarez, Kumaraswamy, Ponnambalam and Victor H. Quintana, "Transmission Expansion under Risk using Stochastic Programming", in Proc. of the 9th Internationa l Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems(PMAPS), KTH, Stockholm, Sweden, 2006

[2] Rishen Fang and David J.Hill, "A New Strategy for Tra nsmission Expansion in Competitive Electricity Markets", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, No.4, pp.374-380, 2003

[3] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia and S. Haffner, "Tes t systems and mathematical models for transmission net work expansion planning", IEE Proc. Gener.Transm. Distr ib., 2002, 148, (5), pp.482-488