

온라인 高速 想定事故 解析의 選擇에 관한 研究

(A Study on the on-line Fast Automatic Contingency Selection)

宋 吉 永
李 暎 宰
金 榮 漢
盧 大 錫

高麗 大 學 校
韓 電 發 電 處
韓 電 發 電 處
高麗 大 學 校

1. 서론

전력계통 운용에서 사고를 가정하여 그와 같은 사고가 실제로 발생하거나 또는 설비의 점검 및 보수를 위해 어느 설비를 정지 혹은 제외 시킬 때 계통의 안전도(security)가 어떻게 될 것인가를 사전에 파악하여 만일 안전하지 않을 경우에는 신속히 예방 조치를 취하도록 함으로서 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 상정사고 해석의 필요성이 날로 높아가고 있다. (2.3)

전력계통이 복잡 다양하고 대규모인 계통에서는 사고의 종류도 다양하고 요인도 많아 고려해야 할 상정사고수도 팽대하게 되는데 이들 모두를 실시간 제어를 위해 해석하기에는 ILPE(Iterative linear power Flow) 및 FDLF(Fast Decoupled Load Flow) 등의 빠른 해석기법이 개발 되었어도 거의 불가능하다.

따라서 상정사고 해석시간을 줄이는 것보다 상정사고수를 줄이는 방법이 더 효과적이어서 고속간이기법으로 계통에 큰 영향을

주는 가혹한 상정사고만을 선택해서 이것만을 상세해석하는 상정사고 선택법(Contingency Selection Method)이 널리 적용된다.

본 연구에서는 상정사고의 고속간이 해석을 위해 직류조류 계산법(Dc Load Flow)에 보상이론(Compensation Theorem)을 응용하였고, 상정사고 손외결정에 선로의 과부하율을 고려하여 한계치 종류별로 새로운 가혹도 평가지수(Severity Performance Index)를 도입함으로써 상정사고 선택의 신뢰성을 향상시켰으며, 더욱이 한계치 변경승수(Limit Change Multiplier)를 도입함으로써 가혹도 평가지수 산정시 한계치 변경의 편리성을 도모하였다.

2. 종래의 상정사고 해석법

2.1 분배계수법(Distribution Factor method)

이것은 상정사고 해석에서 가장 널리 사용

되어진 방법으로서 선로 사고나 발전기 사고가 일어났을 때 조류 변화가 회로 임피던스에 의존하는 본배계수에 의해 계산되는 것이다.

예를 들어 선로 사고 l_{km} 이 일어났을 때 다른 선로 l_{ij} 의 본배계수는

$$DF_{ij}^{km} = - \frac{\Delta\theta_i - \Delta\theta_j}{x_{ij}} \dots (1)$$

이고, 선로 l_{ij} 의 전력조류 변화는

$$\Delta P_{ij} = DF_{ij}^{km} \cdot P_{km}^{(0)} \dots (2)$$

에 의해 계산된다.

만, $x_{ij} = (i, j)$ 와의 임피던스
 $\Delta\theta_i, \Delta\theta_j = (i, j)$ 와의 위상각 변화
 $P_{km}^{(0)} =$ 사고전 l_{km} 의 순간전력

이 방법은 본배계수의 선형화에 의해 계산시간에서 잇점을 가지지만 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. [4]

2.2 경사법(Gradient Method)

이것은 유효전력의 과부하 크기를 측정하는 시스템 평가지수(PI)를 정의해서, 시스템 변화요소에 따른 평가지수의 1차 민감도(First Sensitivity)에 의해 상정사고 순위를 결정하는 방법이다.

평가지수는 다음과 같이 정의되고

$$PI = \sum_{k=1}^n h_k(\theta_k) \dots (3)$$

만, $h_k(\theta_k)$: 유효전력의 과부하율을 위상각함수로 환산한 함수.

1차 민감도는

$$\Delta PI = \sum_{k=1}^n \frac{\partial h_k}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k \dots (4)$$

$$= \sum_{k=1}^n \hat{\theta}_k \theta_k \Delta \theta_k \dots (5)$$

단 B_k : 선로 k 의 서셉턴스 변화

$\hat{\theta}_k$: adjoint network의 위상각변화

이 방법은 단일사고에 대해서 적용시킬 수 있지만, 이중선로사고에 대해 적용이 불가능하고, 1차 민감도의 사용에 의해 계산속도는 양호하나 신뢰성 면에서는 좋지 못하다. [4]

3. 새로운 상정사고 해석방법

모든 상정사고를 상세해석하는 것은 계산시간의 부담 때문에 온라인에 적용시킬 수 없으므로 상정사고 선택을 위해 고속 간이 기법이 이용되는데 초고압송전계통이 적고 전압문제가 심해하지 않는 계통에서는 직류조류 계산법이 널리 이용된다.

본 연구에서는 직류조류 계산법에 보상이론을 응용하므로써 일시적 선로사고(Temporary Line Outage)의 해석을 위해 매번 B행렬의 역행렬을 구하지 않아도 되며 초기 역변환에도 삼각화 인수(Triangular Factor) LDLT법을 이용하여 계산시간을 단축시켰다.

3.1 직류조류법(Dc Load Flow Method)

일반적으로 직류조류 계산법은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta P] = [B][\Delta \theta] \dots (6)$$

단, ΔP : 모선주입전력 변화분 벡터

B : 직렬 서셉턴스 행렬(병렬분무시)

$\Delta \theta$: 전압위상각 변화분 벡터

(6)식을 상정사고 해석에 이용하는 경우 사고에 따른 모선주입전력 변화분을 알 수 있다면 사고후 전압위상각 변화는 다음과 같

다.

$$[\Delta\theta] = [B^{-1}][\Delta P] \dots\dots (7)$$

예를 들어 선로 l_{km} 이 상정사고로 계통에서 제외된 경우, 선로 l_{ij} 의 조류변화를 계산하기 위해 먼저 모선 i 의 전압의상과 변화를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta\theta_j \\ \Delta\theta_k \\ \Delta\theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ii} & X_{ij} & X_{ik} & X_{im} \\ X_{ji} & X_{jj} & X_{jk} & X_{jm} \\ X_{ki} & X_{kj} & X_{kk} & X_{km} \\ X_{mi} & X_{mj} & X_{mk} & X_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_{km} \\ -\Delta P_{km} \end{bmatrix} \dots\dots (8)$$

(8)식을 정리하면

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_i &= (X_{ik} - X_{im}) \Delta P_{km} \\ \Delta\theta_j &= (X_{jk} - X_{jm}) \Delta P_{km} \\ \Delta\theta_k &= (X_{kk} - X_{km}) \Delta P_{km} \\ \Delta\theta_m &= (X_{mk} - X_{mm}) \Delta P_{km} \end{aligned} \right) \dots\dots (9)$$

$$\Delta\theta_{ij} = \Delta\theta_i - \Delta\theta_j = (X_{ik} - X_{im} - X_{jk} + X_{jm}) \Delta P_{km} = X_{ij, km} \Delta P_{km} \dots\dots (10)$$

$$\Delta\theta_{km} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m = (X_{kk} + X_{mm} - 2X_{km}) \Delta P_{km} = X_{km, km} \Delta P_{km} \dots\dots (11)$$

이와같이 전압의상과의 변화분을 알게되면 사고후의 선로조류변화는

$$\Delta P_{ij}^{(k)} = (\Delta\theta_i - \Delta\theta_j) \frac{-1}{X_{ij}} \dots\dots (12)$$

이 되며, 따라서

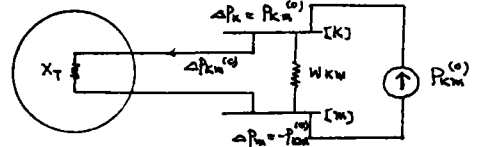
각각의 상정사고에 대하여 계통에 주는 모선주입전력을 구하는 것이 관건이다.

3.2 단일선로 사고

일시적 단일선로 사고에 대한 보상모선주입전력은 헤브난정리에 기초를 둔 보상이론을 응용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(그림1)에서 선로 l_{km} 이 상정사고로 하여 계통에서 제외시키는 경우는 $W_{km} = -X_{km}$ 을

더해주면 계통에 동일한 효과를 가져온다.



(그림1) 단일선로 사고시 보상법

따라서 보상모선주입전력은 다음과 같다.

$$\Delta P_{km}^{(c)} = P_{km}^{(e)} - \frac{\Delta\theta_{km}}{W_{km}} \dots\dots (13)$$

$$\Delta\theta_{km} = \Delta P_{km}^{(c)} \cdot X_T \dots\dots (14)$$

$$\Delta P_{km}^{(c)} = \frac{W_{km}}{X_T + W_{km}} P_{km}^{(e)} \dots\dots (15)$$

여기서 X_T 는 헤브난 등가리액턴스로 지로 리액턴스 행렬의 대각선 행렬이다. [1]

위의 식을 (9)에 대입하면

$$\Delta\theta_i = (X_{ik} - X_{im}) \frac{X_{km}}{X_{km} - X_{km, km}} P_{km}^{(e)} (16)$$

3.3 이중선로 사고

이중선로 사고로 선로 l_{ij} 와 l_{km} 이 동시에 계통에서 제외되는 경우의 보상모선주입전력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ij}^{(c)} \\ \Delta P_{km}^{(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ij, ij} + W_{ij} & X_{ij, km} \\ X_{km, ij} & X_{km, km} + W_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{ij} \\ W_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ij}^{(e)} \\ P_{km}^{(e)} \end{bmatrix} \dots\dots (17)$$

3.4 새로운 가혹도 평가지수

종래의 상정사고 순위결정을 위한 평가지수는

$$PI = \sum_{l_{km}} W_{km} \left(\frac{P_{km}}{P_k} \right)^{2n} \dots\dots (18)$$

이 사용되었는데 이 방법이 신뢰성을 약화시키는 "Masking Problem"의 문제점을 유발한다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 선로의 과부하율을 고려하여 상정사고 순위가 선정되도록 새로운 가혹도 평가지수의 알고리즘을 개발하였다.

$$SI(K) = \sum_{l_{km}} W_{km} \left(\frac{IP_{km} - AP_{km}(K)}{AP_{km}(K)} \right)^2 \dots\dots (19)$$

단 A: 한계의 변경승수

$P_{\alpha}(k)$: 선로의 유효전력 한계치

K: 선로의 한계치 종류

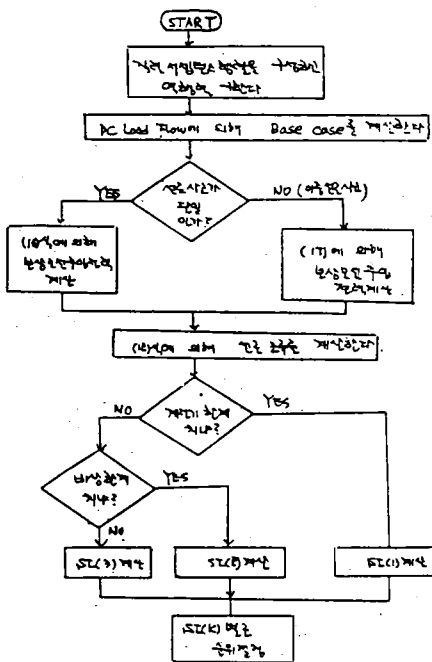
Q: $1/P_{\alpha 1} - A/P_{\alpha}(k)$ 가 양수인 선로

P_{α} : 선로의 유효전력

W_{α} : 선로별 가중치수

n: 자수

4. 알고리즘



(그림2) 상정사고 선택 알고리즘

5. 적용예 및 결과

연구 사례로는 IEEE 25 Bus 모델계통[6]을 이용하였는데 적용결과에 의하면 본 연구에서 제안된 방법이 계산시간 및 상정사고 선택의 신뢰성 면에서 종래의 방법보다 우수함을 확인할 수 있었으며, 또한 실시간 제어 위한 실용성을 입증할 수 있었다.

순위	간략 번호	가중도 평가지수			최대 위치차분	최대 약화비
		$P_{\alpha}(1)$	$P_{\alpha}(2)$	$P_{\alpha}(3)$		
1	12	.2668E-01			1.7450	33
2	11	.1248E-01			1.6700	28
3	17	.6040E-02			1.6000	29
4	2	.4000E-03			1.5300	27
5	16		.1902E-01		1.4350	24
6	6		.5662E-02		1.3967	54
7	9		.2899E-02		1.3700	19
8	13		.2699E-02		1.3675	14
9	7		.2630E-02		1.3667	10
10	10			.6650E-01	1.2600	18
11	8			.3534E-01	1.1580	9
12	5			.1690E-01	1.1200	32
13	1			.1318E-01	1.1033	10
14	15			.5625E-02	1.0750	21
15	14			.2500E-02	1.0500	31
16	32			.2025E-02	1.0450	33
17	27			.4694E-03	1.0270	2

(속3) 새로운 가중도 평가지수에 의한 결과

6. 결론

- (1) 상정사고 해석을 위해 직류조류 계산법에 보상이론을 응용하므로서 고속간이 해석을 기할 수 있었다.
- (2) 선로의 한계치 종류별로 평가지수를 계산하므로서 상정사고 순위결정에 신뢰성을 높일 수 있었다.
- (3) 선로의 한계치 변경승수를 도입하므로서 한계치 허용값을 손쉽게 변경할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 송길영 : "전력계통의 해석 및 운용", 동일출판사, 1984, 제3장, PP91-131.

[2] G.C.Ejebe and B.F.Wollenberg : "Automatic Contingency Selection", IEEE, Vol. PAS-100, PP97-109, Jan/Feb 1979.

[3] G.D.Irrisavvi and A.M.Sasson :

"An Automatic Contingency Selection
On-line Security Analysis", IEEE,
Vol. PAS-100, PP1938-1844,
April,1981.

[4] F. Albuyeh, A. Bose and Heath :

"Reactive Power Considerations in
Automatic Contingency Selection",
IEEE, Trans on PAS, May,1982.

[5] W.F.Tinny : "Compensation Methods
for Network Solutions by Optimubly
Ordered Triangular Factorization",
IEEE, Trans on PAS, Jan, 1972.

[6] R.B.Gungor, N.F.Tsang and B.Webb :

"A Technigue for Optimizing Real
and Reactive Pover Schedules",
IEEE, Trans on PAS, July,1971.