

고속 오차수정계산법의 사용에 의한 상정사고 해석법
(개선된 PQ 분리등가회로를 이용한 고속상정사고 해석법)

송길영
고려대학교

김영한
한국전력공사

최상규^o
고려대학교

A method for contingency analysis by using fast correction method of errors.

Gil-Yeong Song
Korea University

Yeong-Han Kim
Korea Electric Power Corporation

Sang-Geu Choi
Korea University

Abstract

This paper presents a fast realistic method based on a P-Q decoupled linearized model for contingency analysis.

This method involves new idea to correct the errors caused by neglecting the resistance of transmission lines and/or by linearizing the model.

The idea is to use fast correction method of errors by the principle of superposition for compensating these errors. Results demonstrating the effectiveness of the method on 25-bus model system and IEEE30-model system are presented

1. 서론

최근 전력계통의 운용에 있어서 경제성 및 신뢰성을 필요로 하기 때문에 계통운용상태의 온-라인 감시와 예방제어에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 상정사고해석은 그러한 기초데이터를 제공하여 주는 것으로서 해석계산에는 고속성이 요구되고 있다. 이러한 상정사고해석을 위해 사고를 모의할 경우에는 계통구성의 변화에 대응해서 계수행렬을 변경하는 방법이 일반적이지만 각 사고시 그와같은 변경을 할 경우에는 고속화가 어렵게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 주입전력을 이용하여 사고를 모의하는 방법이 제안되었다. (1)-(3)

이 주입전력을 이용하는 방법은 고속계산이 가능

하지만 저항분의 무시 및 선형화 등에 따른 근사화에 기인해서 오차가 크게 나타나는 경향을 볼 수 있다. 따라서, 최근에 이와같이 발생하는 오차를 줄이기 위한 방법으로 PQ분리 등가회로를 이용한 고속상정사고 해석법이 제안되었다. (4)

이 방법은 해의 정확도면에서 큰 진전을 보여주고 있으나 오차수정계산에서 많은 계산량을 필요로 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 이 PQ분리등가회로를 이용한 고속 상정사고 해석법의 정확도를 향상시키면서 오차수정시에 소요되는 계산시간을 단축시킬 수 있는 알고리즘 개발에 역점을 두었다. 이를 위해 상정사고 해석모델의 보다 정확한 구성과 오차수정계산에서는 모든 모선에 대해서 오차수정을 위한 주입전류를 투입하지 않고 상정사고 해석모델을 구성할때 무시된 나머지항의 영향이 크게 나타나는 모선에만 주입전류를 투입하는 고속 오차수정계산법을 사용하였다. 이와같이 개발된 상정사고 해석 알고리즘을 25-모선 모델계통과 IEEE30-모선 모델계통에 적용하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 상정사고 해석모델

모선 s-r 사이의 선로에 흐르는 유효, 무효 전력 조류는 다음식으로 쓸 수 있다.

$$P_{sr} = g_{sr} \{ N_{sr}^2 V_s^2 - N_{sr} V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r) \} + b_{sr} N_{sr} V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r) \quad (1)$$

$$Q_{sr} = b_{sr} \{ N_{sr}^2 V_s^2 - N_{sr} V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r) \} - g_{sr} N_{sr} V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r) - C_{sr} N_{sr} V_s^2 \quad (2)$$

$$P_{rs} = g_{sr} \{ V_r^2 - n_{sr} V_s V_r \cos(\theta_r - \theta_s) \} + b_{sr} n_{sr} V_s V_r \sin(\theta_r - \theta_s) \quad (3)$$

$$Q_{rs} = b_{sr} \{ V_r^2 - n_{sr} V_s V_r \cos(\theta_r - \theta_s) \} - g_{sr} n_{sr} V_s V_r \sin(\theta_r - \theta_s) - c_{rs} V_r^2 \quad (4)$$

여기서, $g_{sr} = \frac{r_{sr}}{r_{sr}^2 + x_{sr}^2}$, $b_{sr} = \frac{x_{sr}}{r_{sr}^2 + x_{sr}^2}$

r_{sr} : 모선 s-r 간의 선로저항

x_{sr} : 모선 s-r 간의 선로 리액턴스

n_{sr} : 모선 s-r 간의 변압기 Tap 값

c_{rs} , c_{rs} : 모선 s-r 간의 선로의 병렬 리액턴스

앞의식(1)-(4)로부터 위상각과 전압크기의 미소변화에 대한 유효, 무효전력조류의 변화량을 얻을 수 있다. 지금 이 유효분과 무효분을 분리시켜서 등가회로로 나타내기 위해 유효, 무효전력조류의 변화량을 각각 다음과 같은 근사식으로 표현할 수 있다.

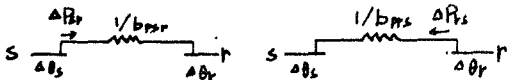
$$\Delta P_{sr} \approx b_{sr} n_{sr} V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r) (\Delta \theta_s - \Delta \theta_r) + g_{sr} n_{sr} V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r) (\Delta \theta_s - \Delta \theta_r) = b_{psr} (\Delta \theta_s - \Delta \theta_r) \quad (5)$$

$$\Delta P_{rs} \approx b_{sr} n_{sr} V_s V_r \cos(\theta_r - \theta_s) (\Delta \theta_r - \Delta \theta_s) + g_{sr} n_{sr} V_s V_r \sin(\theta_r - \theta_s) (\Delta \theta_r - \Delta \theta_s) = b_{prs} (\Delta \theta_r - \Delta \theta_s) \quad (6)$$

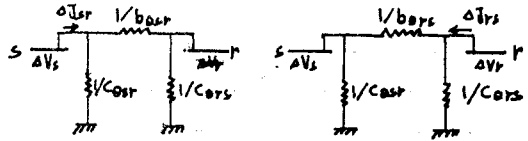
$$\Delta J_{sr} = \Delta Q_{sr} / V_s \approx b_{sr} n_{sr} \cos(\theta_s - \theta_r) (\Delta V_s - \Delta V_r) + g_{sr} n_{sr} \sin(\theta_s - \theta_r) (\Delta V_s - \Delta V_r) + \{ 2 n_{sr} (b_{sr} - c_{sr}) - b_{sr} n_{sr} \cos(\theta_s - \theta_r) \} \times (1 + V_r/V_s) - g_{sr} n_{sr} \sin(\theta_s - \theta_r) \} \Delta V_s = b_{osr} (\Delta V_s - \Delta V_r) + c_{sr} \Delta V_s \quad (7)$$

$$\Delta J_{rs} = \Delta Q_{rs} / V_r \approx b_{sr} n_{sr} \cos(\theta_r - \theta_s) (\Delta V_r - \Delta V_s) + g_{sr} n_{sr} \sin(\theta_r - \theta_s) (\Delta V_r - \Delta V_s) + \{ 2 (b_{sr} - c_{sr}) - b_{sr} n_{sr} \cos(\theta_r - \theta_s) \} \times (1 + V_s/V_r) - g_{sr} n_{sr} \sin(\theta_r - \theta_s) \} \Delta V_r = b_{ors} (\Delta V_r - \Delta V_s) + c_{rs} \Delta V_r \quad (8)$$

이상의 관계식(5),(6),(7),(8)로부터, 유효전력과 위상각, 무효전류와 전압크기의 각 미소변화분을 각각 전류와 전압으로 대응시킨다면 다음 그림 2와 같은 유효분, 무효분 등가회로를 얻을 수 있다.



(A) 유효분 등가회로



(b) 무효분 등가회로

그림 2. 송전선(변압기)종분등가회로

3. 고속 상정사고 해석

앞에서 구성한 상정사고 해석모델로부터 유효분 및 무효분 등가회로는 각각 다음식(9),(10)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = [B'] \Delta \theta \quad (9)$$

$$\Delta J = [B''] \Delta V \quad (10)$$

위의 식에서 계수행렬 B' , B'' 는 계통구성과 계통상태에 따라서 결정되는 계수행렬로서 정수화 및 삼각화분해시켜서 계산하게 된다. 선로 상정사고 해석을 위한 사고후의 위상각과 전압크기의 계산은 다음과 같다.

3-1. 위상각 계산

모선 s-r 간의 선로사고후의 위상각 계산은 사고전 송전선에 흐르고 있던 유효전력조류를 제거한 것과 같은 전류원 A_s , A_r 을 구해서 다음식(11),(12)로부터 구할 수 있다.

$$\theta_i = \theta_i^0 + \Delta \theta_i^1 \quad (i=1,2,\dots,n-1) \quad (11)$$

$$\Delta \theta_i^1 = \Delta \theta_i^0 A_s + \Delta \theta_i^0 A_r \quad (12)$$

여기서, n : 모선수

$\Delta \theta_i^0, \Delta \theta_i^1$: 각각 사고선로의 송전단 s, 수전단

r 에 단위전류를 주입한 경우에 대한

모선 i 에 나타나는 위상각 변화량.

위의 식에서 $\Delta \theta_i^0, \Delta \theta_i^1$ 은 sparse vector method 의 고속전진 대입법을 사용하면 고속계산이 가능하다.

3-2. 전압크기의 계산

전압크기의 계산도 앞의 위상각의 계산과 마찬가지로 사고전 송전선에 흐르고 있던 무효전류를 제거한 것과 같은 전류원 R_s, R_r 을 구한 다음, 다음식(13),(14)로부터 계산할 수 있다.

$$V_i = V_i^0 + \Delta V_i' \quad (i=1, 2, \dots, n|e) \quad (13)$$

$$\Delta V_i' = \Delta V_i^s R_s + \Delta V_i^r R_r \quad (14)$$

여기서, n|e: 슬랙모선과 PV지정모선을 제외한 모선 수

$\Delta V_i^s, \Delta V_i^r$: 각각 사고선로의 송전단 모선 s 와 수전단 모선 r 에 단위전류를 주입한 경우에 대한 모선 i 에 나타나는 전압 크기의 변화량.

위의 식에서 $\Delta V_i^s, \Delta V_i^r$ 도 sparse vector method 의 고속전대입법을 사용하면 고속계산이 가능하다.

3-3. 고속 오차수정계산

사고후의 위상각과 전압크기는 앞절에서 처럼 계산할 수 있지만 사고에 따른 계통상태의 변화가 큰 경우에는 해석모델의 근사화에 따른 오차를 무시할 수 없게 된다. 따라서 이와같이 발생하는 오차를 줄이기 위하여 상정사고 해석모델을 구성할때 무시된 성분을 이미구한 $\Delta \theta^0, \Delta V^0$ 를 사용해서 사고선로를 제외한 전체의 송전선에 대하여 계산하고 다음과 같이 계산되는 각 모선에서의 총화를

$$\Delta P_i^0 = \sum_j \Delta P_{ij}^0 \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (15)$$

$$\Delta J_i^0 = \sum_j \Delta J_{ij}^0 \quad (i=1, 2, \dots, n|e) \quad (16)$$

여기서, j : 모선 i 에 연결된 모든 모선.

$\Delta P_{ij}^0, \Delta J_{ij}^0$: 각각, 상정사고해석모델을 구성할때 무시된 유효, 무효성분.

주입전류와 대응하는 모선에 투입하여 식(9), (10) 으로부터 위상각과 전압크기의 변화량에 대한 수정량 $\Delta \theta^0, \Delta V^0$ 를 각각 구할 수 있다. 그러나, 이와같이 각 모선에 대하여 오차수정을 위한 주입전류를 구하여서 식(9), (10)을 풀게되면 이 오차수정계산에서 많은 계산량을 요구하기 때문에 본 연구에서는 앞에서 상정사고해석모델을 구성할때 무시되었던 나머지항들의 영향이 비교적 크게 나타나는 모선을 결정한 후 이들 모선에 대해서만이 오차수정을 위한 주입전류를 투입하는 고속오차수정계산법을 사용하였다.

이 고속수정계산은 다음과 같은 사실에 그 이론적

기초를 두고 있다. 즉, 앞의 수정계산에서 $\Delta \theta^0, \Delta V^0$ 를 구하기 위하여 식(9), (10)을 전진-후진 대입법으로 풀게되는데, 이것을 다음식(17), (18) 과 같이 중첩의 정리를 이용한 식으로 계산할 수 있다. $\Delta \theta_i^0 = \sum_{j=1}^{n-1} \Delta \theta_{ij}^0 \Delta P_j^0 \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (17)$

$$\Delta V_i^0 = \sum_{j=1}^{n|e} \Delta V_{ij}^0 \Delta J_j^0 \quad (i=1, 2, \dots, n|e) \quad (18)$$

여기서, $\Delta \theta_{ij}^0, \Delta V_{ij}^0$: 모선 j 에 단위전류를 투입하였을 때 모선 i 에 나타나는 위상각과 전압크기의 변화량.

지금, 앞의식(17), (18)에서, $\Delta \theta_{ij}^0, \Delta V_{ij}^0$ 는 일반적으로 $\Delta \theta_{ij}^0 \ll 1, \Delta V_{ij}^0 \ll 1$ 인 값을 갖게 되고, 사고선로로부터 전기적 거리가 먼 $\Delta P_j^0, \Delta J_j^0$ 는 아주 작은 값을 갖게 된다. 결국, 이들 작은 값을 갖는 $\Delta P_j^0, \Delta J_j^0$ 는 $\Delta \theta_i^0, \Delta V_i^0$ 의 값에 거의 영향을 주지 않게 된다. 이런 이유에서 오차수정을 위한 주입전류 $\Delta P_j^0, \Delta J_j^0$ 를 투입해 줄 필요가 있는 모선을 결정한 다음 이들 모선들에 대해서만이 주입전류를 투입해 주면 된다.

지금, 위상각과 전압크기의 변화량에 대한 오차수정을 위하여 주입전류를 투입해 줄 필요가 있는 모선의 집합은 각각 다음식으로 정의 할 수 있다.

$$S_p = \{j : |\Delta P_j^0| \geq \epsilon_p\} \quad (19)$$

여기서, ϵ_p : 주입전류 ΔP_j^0 의 한계치

$$S_q = \{j : |\Delta J_j^0| \geq \epsilon_q\} \quad (20)$$

여기서 ϵ_q : 주입전류 ΔJ_j^0 의 한계치

위의식(19), (20)에서 한계치 ϵ_p, ϵ_q 를 $\epsilon_p = \epsilon_q = 10^{-5}$ 로 선정해 주면 식(17), (18)의 $\Delta \theta_i^0, \Delta V_i^0$ 에서 발생하는 오차는 소수점(N+1)이하에서 생기게 된다. 따라서, 한계치 ϵ_p, ϵ_q 의 선정은 상정사고 해석을 얼마나 정확하게 할것인가에 따라 달라진다. 본 연구에서는 $\epsilon_p = \epsilon_q = 10^{-5}$ 으로 선정하였고, 이 한계치의 선정으로 인해 발생하는 오차는 $\Delta \theta_i^0, \Delta V_i^0$ 값에 무시할 수 있을 만큼 거의 영향을 주지 않는다. 이상에서와 같이 주입전류 $\Delta P_j^0, \Delta J_j^0$ 의 투입모선을 결정하게 되면 $\Delta \theta^0, \Delta V^0$ 는 중첩의 정리를 이용한 다음식(21), (22)를 사용해서 고속으로 계산할 수 있다.

$$\Delta \theta_i^* = \sum_j \Delta \theta_{ij}^* \Delta P_j^* \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (21)$$

여기서, $j: j \in S_p$

$$\Delta V_i^* = \sum_j \Delta V_{ij}^* \Delta J_j^* \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (22)$$

여기서, $j: j \in S_q$

위의 식(21), (22)에 의해서 $\Delta \theta_i^*$, ΔV_i^* 를 계산한 다음, 다음과 같이 사고후의 위상각과 전압크기를 계산할 수 있다.

$$\theta_i = \theta_i^0 + \Delta \theta_i^* + \Delta \theta_i^* \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (23)$$

$$V_i = V_i^0 + \Delta V_i^* + \Delta V_i^* \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (24)$$

지금까지 설명한 상정사고 해석법에 대한 흐름도 다음 그림 3과 같다.

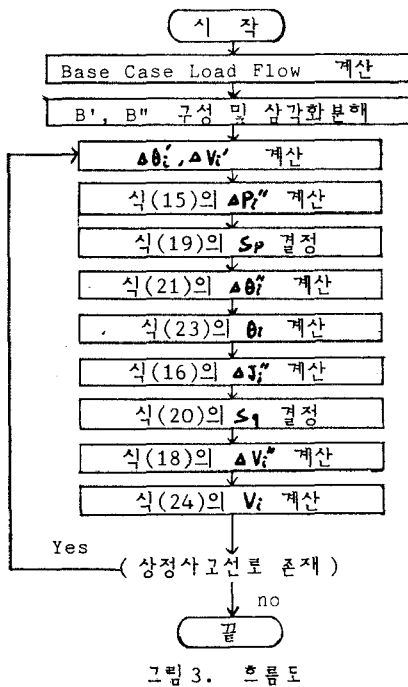


그림 3. 흐름도

4. 모델계통에 대한 적용

본 연구에서 제안한 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 이것을 25-모선 모델계통과 IEEE30-모선 모델계통에 적용하였다.

표 1은 IEEE30-모선 모델계통에 대하여 종래의 PQ분리동기회로를 이용한 고속상정사고 해석법(a)와 본 연구에서 제안하는 방법(b)와의 계산결과의 정확도를 비교한 것이다. 이 두방법의 정확도를 비교하기 위하여 고속분할 조류계산법의 수렴값 ($\Delta P < 10^{-4}$, $\Delta \theta < 10^{-4}$) 을 참값으로 사용하였다.

이 표 1을 살펴보면 본 연구에서 제안하는 방법의 정확도가 상정사고해석모델의 보다 정확한 구성으로 인해서 종래의 방법에 비해서 개선된다는 것을 알 수 있다.

표 1. 단일선로 상정사고해석 결과의 정확도 비교 (%)

사고선로	위상각의 평균오차(radian)		전압크기의 평균오차	
	(a)	(b)	(c)	(d)
L1	1.130	1.127	0.039	0.029
L2	0.045	0.0413	0.066	0.066
L3	0.020	0.0195	0.024	0.023
L4	0.075	0.061	0.200	0.196
L5	0.197	0.119	0.026	0.005
L6	0.025	0.024	0.011	0.008
L7	0.049	0.059	0.061	0.056
L8	0.038	0.0211	0.031	0.030
L9	0.042	0.046	0.118	0.118
L10	0.005	0.027	0.012	0.012

다음에, 표 2는 단일선로 상정사고 해석을 하는데 소요되는 계산시간을 비교한 것이다. 이 표 2에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안하는 방법이 종래의 방법에 비해서 단일선로사고에 대한 전체상정사고 해석시간을 약 1/3이상 단축시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

표 2. 단일선로 상정사고해석시간의 비교

모델 계통	상정사고 해석법	
	(a)	(b)
25-모선 계통	11	7
30-모선 계통	17	11

5. 결 론

- (1) 종래의 방법에 비해서 상정사고 해석모델을 정확하게 구성함으로써 상정사고해석결과의 정확도를 높일 수 있었다.
- (2) 오차수정계산에서, 중첩의 정리를 이용한 고속 수정계산법의 사용과 단위주입전류를 투입한 것에 대한 각 모선의 위상각과 전압크기의 변화량을 sparse vector method 를 사용

하여 구하므로써 전체상정사고해석시간을 약
1/3이상 단축시킬수 있었다.

- (3) 본 연구에서는 단일선로 상정사고해석에 대해
서 이 방법을 적용하였지만 다중선로 상정사고,
발전기사고등에 대해서도 유사한 결과가 얻어
질 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) W.F. Tinney : "Compensation Methods
for Network Solutions by Optimally
Ordered Trianguilay Factorization",
IEEE Trans Power Apparatus Syst,
PAS-91, 123(1972)
- (2) M.S. Sachdev & S.A. Ibrahim : "A
Fast Approximate Technique for Outage
Studies in Power System Planning and
Operation", *ibid*, PAS-93, 1133(1974)
- (3) K.R. Mamandur & G.J. Berg : "Effici-
ent Simulation of Line and Transfor-
mer Outages in Power Systems", *ibid.*,
PAS-101, 3733(1982)
- (4) 李東健, 田中英一, 長谷川淳:
「PQ分離等価回路による高速想定事故解析手法」
電気学会論文誌 B分冊 107巻 1号 pp.9-16 (1986)
- (5) J. Zaborsky, K.W. Whang, K.Prasad,
"Fast Contingency Evaluation Using
Concentric Relaxation", *ibid*, Vol.
PAS-99, pp.28-36, January/February
1980.
- (6) W.F. Tinney, V.Brandwajn, and S.M.
Chan, "Sparse Vector Methods", *ibid*,
Vol. PAS-104, pp.295-301, February
1985.