

전력설비 절연유 열팽창 계산식 개선에 관한 연구

임성환 · 문봉수
한국전력공사

A study on the improvement of the thermal expansion formula of the insulating oil in electric facilities

Seong-Hwang Rim · Bong-Soo Moon
Korea Electric Power Corporation

Abstract - The transformer and the OF cable are cooled and insulated by insulating oils in their body.

The insulating oil expands or contracts with the heat transfer according to the operating conditions of the electric facilities. So we install the N₂ gas tank connected with the insulating oil system to overcome the change.

The change of the insulating oil volume for the operation temperature range must be calculated to decide the N₂ gas volume and to set the alarm point for safe operation. It is known that this change is proportional to the temperature change and to the insulating oil volume if the temperature change is small enough.[1][11]

However this proportional formula has been accepted generally in the design of electric facilities for wide operation temperature range such as 40°C ~ 125°C. Hence, it makes large errors in calculation, which can result in serious damage against safe operation of the electric facilities.

This paper presents a improved method of calculating the accurate change of the insulating oil volume to insure the safe operation of electric facilities.

Keywords : Thermal expansion, Insulating oil

1. 서 론

전력계통에 설치되어 있는 변압기나 OF케이블의 경우 설비내부에 절연유를 유입시켜 냉각과 절연을 실시하고 있다. 이러한 전력설비 운전상태와 대기조건에 따라 열이 이동하면 절연유는 팽창과 수축을 하게 되므로 전력설비에는 팽창 또는 수축하는 절연유를 흡수할 수 있는 여분의 공간이 필요하다. 대개의 경우 밀폐된 N₂ 가스공간을 절연유 공간과 접하게 설치하여 팽창 또는 수축한 절연유가 유입 또는 유출될 수 있는 여분의 공간을 만들어 준다.

따라서 온도변화에 따른 절연유 팽창·수축량 계산은 N₂ 가스공간 규모결정 및 전력설비 안전운전을 위하여 운전중의 경보점 설정 등 전력설비 설계의 가장 기본이 되는 사항 중의 하나이다. 변압기나 OF케이블 내부 절연유 팽창·수축량을 계산함에 있어서 지금까지는 다음과 같은 식을 사용하고 있다.

수축·팽창 절연유량 = 절연유량 × 팽창계수 × 온도변화폭
그러나 이 식은 온도 변화폭이 충분히 작은 경우에 성립하는 실험식이다. [1][11]

그럼에도 불구하고, 전력설비의 N₂ 가스공간 설계시 팽창·수축 절연유량 계산 과정에서 40°C ~ 125°C 정도

의 큰 운전 온도 변화폭에도 상기 식을 그대로 적용함으로써 계산오차를 발생시켜 N₂ 가스공간 부족과 경보점 설정 오류를 유발시키고 있다. [2][3][4][5][6]

특히 765kV 격상과 345kV 지중화 등으로 인하여 전력계통 운전전압이 높아지고 설비용량이 커짐에 따라 단위 전력설비내 유입되는 절연유량은 점차 많아지고 있어 향후 계산오차로 인한 이러한 문제는 더욱 커질 것으로 우려된다.

따라서 본 논문에서는 온도변화에 따른 팽창 또는 수축되는 절연유량을 산출하는 방법을 개선함으로써 계산 오차로 인해 전력설비에 가해질 수 있는 위해요소를 사전에 차단하고자 한다.

2. 본 론

2.1 액체의 열팽창

액체는 일정한 형체를 갖추고 있지 않으므로 온도변화에 따라 체적이 팽창하는데 온도 변화전 액체의 체적을 V라 하면 온도가 충분히 작은 ΔT 만큼 변할 경우 액체의 체적팽창량 ΔV는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta V = \beta \times V \times \Delta T \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서 비례상수 β를 체팽창계수라 하는데 상기 식을 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{1}{V} \times \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \text{-----} \quad (2)$$

이 식에 의하면 온도변화 폭에는 관계가 있으나 특정 온도와는 독립적으로 결정됨을 알 수 있다. [1][11]

2.2 절연유 변화유량 계산식

2.2.1 기존식 분석

변압기 또는 OF케이블에 필요한 N₂ 가스공간 계산시 (유압계산이라고 함) 온도변화에 따른 절연유 변화유량 계산에는 식(1)이 채택되고 있다. [2][3][4]

절연유 체팽창계수를 β, 온도 T₁에서 절연유 부피를 V₁라 하고 온도가 T₁에서 T₂로 변한다면 온도변화폭은 T = T₂ - T₁ 이므로 변화유량은 다음과 같이 계산한다.

$$\text{절연유 변화유량} = V_1 \times \beta \times T \quad \text{-----} \quad (3)$$

2.2.2 개선식 유도

온도 변화폭(T = T₂ - T₁)을 n등분(n = $\frac{T}{\Delta T}$)하여 ΔT씩 점차 증가한다고 가정하면 온도 T₂에서의 절연유 부피 V₂는 다음 수열의 마지막 항으로 표시된다.

$$V_1, V_1 \times (1 + \beta \Delta T), \dots, V_1 \times (1 + \beta \Delta T)^n$$

여기서 "온도 변화폭이 충분히 작다"는 가정을 반영하여 V₂를 나타내는 수열의 마지막 항에 ΔT → 0를 적용하면 다음과 같은 극한값 해석을 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_2 &= \lim_{\Delta T \rightarrow 0} V_1 \times (1 + \beta \Delta T)^{\frac{T}{\Delta T}} \\ &= \lim_{\Delta T \rightarrow 0} V_1 \times (1 + \beta \Delta T)^{\frac{AT}{\beta \Delta T}} \end{aligned}$$

$$= \lim_{\beta \Delta T \rightarrow 0} V_1 \times (1 + \beta \Delta T)^{\frac{1}{\beta \Delta T} \beta T}$$

$$= V_1 e^{\beta T}$$

$$\therefore V_2 = V_1 e^{\beta(T_2 - T_1)} \quad \text{----- (4)}$$

따라서 변화유량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{변화유량} = V_1 e^{\beta(T_2 - T_1)} - V_1 = V_1 [e^{\beta(T_2 - T_1)} - 1] \quad \text{--- (5)}$$

식(1)을 미분방정식으로 바꾸어 풀어도 같은 결과에 도달한다.

2.2.3 기존식과 개선식 계산결과 비교

절연유 체팽창계수를 β , 온도 T_1 에서 절연유부피를 V_1 라하고 온도가 T_1 에서 T_2 로 변화한 다음 다시 T_1 로 복원되었을 때 두 계산식에 의한 총절연유량(초기 절연유량 + 변화유량)을 비교하면 다음과 같다.

표1. 기존식과 개선식의 계산결과 비교

Table 1. The comparison of the result of two formula model

구분	온도 변화	총절연유량 (초기유량 + 변화유량)
기존식	T_1	V_1
	$T_1 \rightarrow T_2$	$V_1 \times [1 + \beta(T_2 - T_1)]$
	$T_2 \rightarrow T_1$	$V_1 \times [1 + \beta(T_2 - T_1)] \times [1 + \beta(T_1 - T_2)]$ $= V_1 \times [1 + \beta(T_2 - T_1)] \times [1 - \beta(T_2 - T_1)]$ $= V_1 \times [1 - \beta^2(T_2 - T_1)^2]$ $= V_1 - V_1 \times \beta^2 \times (T_2 - T_1)^2$
개선식	T_1	V_1
	$T_1 \rightarrow T_2$	$V_1 \times e^{\beta(T_2 - T_1)}$
	$T_2 \rightarrow T_1$	$V_1 \times e^{\beta(T_2 - T_1)} \times e^{-\beta(T_1 - T_2)}$ $= V_1 \times e^{\beta(T_2 - T_1)} \times e^{-\beta(T_2 - T_1)}$ $= V_1$

위 표1을 살펴보면 본 논문에서 제시한 개선식을 사용할 때 온도가 T_1 에서 T_2 로 변화한 다음 다시 T_1 로 복원되었을 때 절연유량이 보존되나 기존식을 사용하면 $V_1 \times \beta^2 \times (T_2 - T_1)^2$ 의 계산오차를 유발하여 절연유량이 보존되지 않음을 볼 수 있다.

2.2.4 실증자료에 의한 계산식 비교

2.2.4.1 사용 Data

실험자료 대신 한국산업규격(KS M 2002-1991 부속서3 표2 325 page)에 수록된 「원유 및 석유제품의 온도에 대한 부피 환산 계수표」를 활용하였다. 이 표의 가로축에는 유류 종류를 구분하기 위하여 15℃의 밀도를 나열하고 세로축에는 온도변화를 표시하여 두축이 마주치는 칸에는 매 온도마다 달라지는 유류의 부피를 15℃로 환산하기 위한 수치를 제공하는데 15℃의 값을 1로 한다.

동일 질량의 온도변화에 따른 부피는 이 표 수치의 역수 값이다. 계산 편의상 15℃에서 밀도 0.900g/cm³인 자료(온도변화폭 : 0℃~75℃)를 사용하였다.

2.2.4.2 회귀분석에 의한 체팽창계수(β) 추정

0℃의 부피를 V_0 라하고 T℃의 부피는 식(4)에 의해 $V = V_0 e^{\beta T}$ 에 따른다고 모의하고 양변에 자연대수를 취하여 T에 관한 1차식을 만들고 이 것을 단순

회귀식으로 하여 V_0 와 β 값을 추정하면 다음과 같다.

$$\text{모의식} : \ln V = \ln V_0 + \beta T$$

$$\text{추정 값} : \beta = \frac{52.9929747}{71725} = 0.000738835$$

$$V_0 = 0.98898005$$

$$\text{결정계수} : r^2 = \frac{52.9929747^2}{71725 \times 0.03915309} = 0.999990866$$

결정계수(r^2)가 거의 1에 가까우므로 위에서 모의한 회귀식은 매우 유효하다고 할 수 있다.

2.2.4.3 기존식과 개선식의 오차분석

두 계산식으로 계산된 온도별 변화유량 값에서 참값(KS M 2002-1991에 수록된 Data 역수값으로 계산한 값)을 뺀 오차를 그래프로 그리면 다음과 같다.

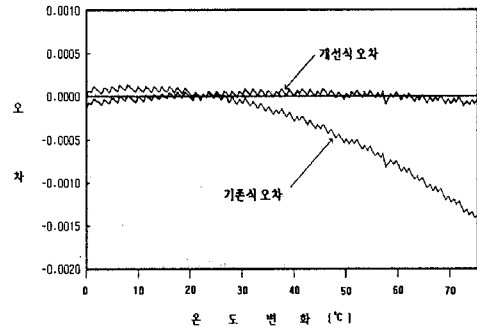


그림 1. 온도변화에 따른 변화유량 계산오차 비교
Fig. 1 The comparison of errors in calculation of volume variation

위의 그림을 분석하면, 개선식은 온도변화 전반에 걸쳐 거의 오차가 없으나 기존식의 경우 온도변화가 커감에 따라 오차가 확대됨을 알 수 있다. 75℃에서는 오차율이 변화유량의 약 3%에 달한다.

2.3 사례연구

2.3.1 단위 전력설비내 절연유 변화량 비교

변압기 1대 또는 OF케이블 1급유구간 등 독립된 절연유 계통의 절연유량은 설계조건에 따라 항상 바뀌는 요소이며, 대략 아래 표2와 같다. 향후 765kV 설비가 계통운전되고 대용량 설비가 증가하면 단위 전력설비내 유입 절연유량은 더욱 늘어날 것으로 예상된다.

표2. 단위 전력설비별 유입 절연유량[8][9][10]
Table 2. The quantity of insulating oil in unit electric facility

구분	절연유량(ℓ)	운전 온도범위
154kV 45/60MVA 3상 변압기	약 30,000	약 -20℃~105℃
345kV 166.7MVA 1상 변압기	약 38,000	약 -20℃~105℃
765kV 666.7MVA 1상 변압기	약 75,000×2	약 -20℃~105℃
345kV OF케이블 1급유구간	약 35,000	약 5℃ ~ 75℃

이러한 대용량 절연유계통의 기존식에 의한 변화유량 계산오차는 표3과 같다.

표3. 계산식에 따른 절연유 변화유량 비교
Table 3. The comparison of the volume variation of two formula model

구분	유량	1,000ℓ	30,000ℓ	50,000ℓ	75,000ℓ
	온도폭				
기존식 (A)	10	8.3	249.0	415.0	622.5
	40	33.2	996.0	1660.0	2490.0
	70	58.1	1743.0	2905.0	4357.5
	125	103.8	3112.5	5187.5	7781.3
개선식 (B)	10	8.3	250.0	416.7	625.1
	40	33.8	1012.7	1687.9	2531.8
	70	59.8	1794.6	2991.0	4486.6
	125	109.3	3279.7	5466.2	8199.2
계산차이 (B-A)	10	0.0	1.0	1.7	2.6
	40	0.6	16.7	27.9	41.8
	70	1.7	51.6	86.0	129.1
	125	5.5	167.2	278.7	417.9

※ 절연유 팽창계수(β) : 0.00083 /℃ 적용

표3을 분석하면 초기 절연유량이 적고 온도변화폭이 작은 경우 두식의 계산 결과는 차이가 미미하나, 초기 절연유량이 많고 온도변화폭이 큰 경우 두식의 계산 결과는 큰 차이를 보인다. 또한 기존식의 경우 변화유량이 적게 계산되어 이를 토대로 설비를 설계하면 N₂ 가스 공간이 부족하게 될 것이다.

2.3.2 OF케이블용 BPT 유조 유효용량 계산식 재검토

2.3.2.1 BPT 동작 개념

변압기도 유사한 계산과정을 거치므로 OF케이블의 변화유량 흡수설비인 BPT 유조용량 계산식에 한하여 그 타당성을 재검토 하고자 한다.

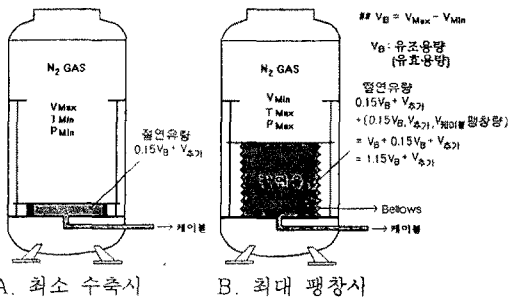


그림 2. 온도변화에 따른 BPT 동작 설명도
Fig. 2 The explanation of BPT operation

그림 2에서 하한온도(T_{Min})가 되면 절연유가 수축되어 BPT를 빠져 나가 케이블로 이동하고 BPT 구조상 유출되지 못하는 유조용량의 약 15%에 해당하는 절연유와 절연유계통 고장 발생시 응급조치 시간동안 안정성을 확보하기 위하여 유조를 좀 더 크게 해야 하는 부피에 해당하는 V_{추가}의 절연유만이 BPT내부에 남게 된다(그림 A). 상한온도(T_{Max})가 되면 유조외부 절연유 계통의 유량인 V_{케이블} 및 유조내부 절연유가 최대 팽창하여 유조 내부로 유입되어 된다(그림 B). 따라서 유조내부 절연유량은 하한온도시에는 0.15 V_B + V_{추가} 이고, 상한시에는 0.15 V_B + V_{추가} + (0.15 V_B, V_{추가}, V_{케이블})의 팽창량이 되고 이것은 1.15 V_B + V_{추가}와 같게 된다.

2.3.2.2 기존 BPT 유조 유효유량(V_B) 계산식

$$V_B \geq \frac{V_r + V_s}{1 - 1.15 \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})} \quad \text{----- (6)}$$

V_r : BPT 외부 절연유 유량 (V_{케이블})의 변화유량
V_s : 고장대비 유량 (V_{추가})의 변화유량

2.3.2.3 기존 BPT 유조 유효유량 계산식 재검토

첫째, 온도가 하한에서 상한 온도로 상승된다고 가정시; 하한온도에서 상한온도로 온도가 변화할 때 BPT내부의 절연유(0.15 V_B, V_{추가})와 BPT 외부절연유 계통 절연유 (V_{케이블})의 팽창량은 각각 0.15 V_B × β × (T_{Max} - T_{Min}), V_{추가} × β × (T_{Max} - T_{Min}), V_{케이블} × β × (T_{Max} - T_{Min})이다. 유효용량은 케이블계통과 BPT 내부 변화유량의 합 이상 이므로 다음 식이 성립한다.

$$V_B \geq (V_{케이블} + V_{추가} + 0.15 V_B) \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})$$

$$V_B [1 - 0.15 \beta \times (T_{Max} - T_{Min})] \geq (V_{케이블} + V_{추가}) \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})$$

$$V_B \geq \frac{(V_{케이블} + V_{추가}) \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})}{1 - 0.15 \beta \times (T_{Max} - T_{Min})}$$

그런데

$$V_{케이블} \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min}) = V_r, \quad V_{추가} \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min}) = V_s$$

이므로

$$V_B \geq \frac{V_r + V_s}{1 - 0.15 \beta \times (T_{Max} - T_{Min})} \quad \text{----- (7)}$$

둘째, 온도가 상한에서 하한온도로 강하된다고 가정시; 상한온도에서 하한온도로 온도가 변화할 때 BPT내부의 절연유(1.15 V_B, V_{추가})와 BPT 외부절연유 계통 절연유 (V_{케이블})의 수축량은 각각 -1.15 V_B × β × (T_{Max} - T_{Min}), -V_{추가} × β × (T_{Max} - T_{Min}), -V_{케이블} × β × (T_{Max} - T_{Min})이다. 유효용량은 케이블계통과 BPT내부 변화유량 합 절대값 이상 이므로 다음 식이 성립한다.

$$V_B \geq (V_{케이블} + V_{추가} + 1.15 V_B) \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})$$

$$V_B [1 - 1.15 \beta \times (T_{Max} - T_{Min})] \geq (V_{케이블} + V_{추가}) \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})$$

$$V_B \geq \frac{(V_{케이블} + V_{추가}) \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min})}{1 - 1.15 \beta \times (T_{Max} - T_{Min})}$$

그런데

$$V_{케이블} \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min}) = V_r, \quad V_{추가} \times \beta \times (T_{Max} - T_{Min}) = V_s$$

이므로

$$V_B \geq \frac{V_r + V_s}{1 - 1.15 \beta \times (T_{Max} - T_{Min})} \quad \text{----- (8)}$$

상기 두가지 경우의 결과인 식(7)과 식(8)은 서로 일치하지 않고 다만 기존에 사용중인 BPT 유효용량(V_B) 계산식인 식(6)은 식(8)에 불과함을 알 수 있다. 이런 결과가 발생한 이유는 2.2.3에서 보인 바와 같이 오류가 내포되어 있는 기존의 변화유량 계산식을 사용하였기 때문 이라 판단된다.

2.3.2.4 개선식에 의한 BPT 유조 유효유량 계산

첫째, 온도가 하한에서 상한온도로 상승된다고 가정시; 하한온도에서 상한온도로 온도가 변화할 때 BPT내부의 절연유(0.15 V_B, V_{추가})와 BPT 외부절연유 계통 절연유 (V_{케이블})의 팽창량은 각각 0.15 V_B × (e^{β × (T_{Max} - T_{Min})} - 1), V_{추가} × (e^{β × (T_{Max} - T_{Min})} - 1), V_{케이블} × (e^{β × (T_{Max} - T_{Min})} - 1) 이다. 유효용량은 케이블계통과 BPT내부 변화유량의 합 이상 이므로 다음 식이 성립한다.

$$V_B \geq (V_{케이블} + V_{추가} + 0.15 V_B) \times (e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1)$$

$$V_B [1 - 0.15 (e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1)] \geq (V_{케이블} + V_{추가}) \times (e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1)$$

$$V_B \geq \frac{(V_{케이블} + V_{추가}) \times (e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1)}{1 - 0.15 [e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1]}$$

그런데

$$V_{케이블} \times (e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1) = V_r, \quad V_{추가} \times (e^{\beta \times (T_{Max} - T_{Min})} - 1) = V_s$$

이므로

$$V_B \geq \frac{V_r + V_s}{1 - 0.15 \times [e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1]} \quad \dots \quad (9)$$

둘째, 온도가 상한에서 하한 온도로 강하된다고 가정시; 상한온도에서 하한온도로 온도가 변화할 때 BPT 내부의 절연유(1.15 V_B, V_{추가})와 BPT 외부 절연유 계통 절연유(V_{케이블})의 수축량은 각각 1.15 V_B × (e^{-β × (T_{ms} - T_{ms})} - 1), V_{추가} × (e^{-β × (T_{ms} - T_{ms})} - 1), V_{케이블} × (e^{-β × (T_{ms} - T_{ms})} - 1)이다. 상기 값은 모두 음수이고, 유효용량은 케이블 계통과 BPT 내부 변화유량 합이 절대값 이상이므로 다음 식이 성립한다.

$$V_B \geq -(V_{케이블} + V_{추가} + 1.15 V_B) \times (e^{-\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1)$$

$$V_B \geq \frac{(V_{케이블} + V_{추가} + 1.15 V_B) \times (e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1)}{e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})}}$$

$$V_B [1 - \frac{1.15(e^{\beta(T_{ms} - T_{ms})} - 1)}{e^{\beta(T_{ms} - T_{ms})}}] \geq \frac{(V_{케이블} + V_{추가})(e^{\beta(T_{ms} - T_{ms})} - 1)}{e^{\beta(T_{ms} - T_{ms})}}$$

$$V_B \geq \frac{(V_{케이블} + V_{추가}) \times (e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1)}{1 - 0.15 \times [e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1]}$$

그런데

$$V_{케이블} \times (e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1) = V_r, \quad V_{추가} \times (e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1) = V_s$$

이므로

$$V_B \geq \frac{V_r + V_s}{1 - 0.15 \times [e^{\beta \times (T_{ms} - T_{ms})} - 1]} \quad \dots \quad (10)$$

상기 두가지 경우의 결과인 식(9)와 식(10)은 서로 일치하므로 BPT 유조유효용량(V_B) 계산식도 식(9)로 바꾸어야 한다고 판단된다.

3. 결 론

변압기나 OF케이블 등 전력설비 내부 절연유 변화량을 계산하는 기존의 식은 충분히 작은 온도변화에 성립하는 식임에도 불구하고, 운전가능 온도범위에 해당하는 큰 온도변화에도 동일하게 적용함으로써 오차를 발생시켜 N₂ 가스공간 부족과 운전과정의 경보점 설정 오류를 유발시킬 개연성이 있음을 살펴보았다.

그리고 기존식과 본 논문에서 제시한 개선식 계산결과에 큰 차이가 있음을 보였으며 대표적으로 변화유량 흡수 설비인 OF케이블 BPT 유조용량 계산식에 적용하여 그 타당성을 재검토하였다. 그 결과 잘못된 변화유량 계산식을 적용한 결과물인 현재 사용하고 있는 OF 케이블의 BPT 유조 유효용량 계산식에도 문제가 있음을 보이면서 새로운 BPT 유조 유효용량 계산식도 유도하였다.

특히 기존의 변화유량 계산식의 결과는 변화유량을 실제보다 적게 계산하므로 이런 계산오류를 방지할 경우, 이것은 전력설비 설계오류를 유발시키고 전력설비 안전성에 위해요인을 제공하게 된다.

현실적으로 전력설비 설계시 계산된 값 이외에 상정치 못한 상황이 발생될 것에 대비하여 여유값을 추가하고 있는 것이 사실이나, 계산식에서 오류가 발생하여 이 여유값을 잠식한다면 정말로 여유값이 작용해야 할 상황이 발생했을 때 전력설비는 대처능력을 상실하여 곧바로 사고로 발전할 가능성이 높아진다.

본 논문에서 제시하는 변화유량 개선식은 지극히 당연한 식으로 간과할 수도 있으나 엄청나게 많은 전력설비들이 잘못된 기존식에 의해 위험요소를 지니고 지속적으로 설치되고 있음을 볼 때 그 심각성은 엄청나다 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] David Halliday, Robert Resnick, "Fundamentals of PHYSICS", Second Edition, Jan. 1981.
- [2] 電力ケーブル技術ハンドブック改訂委員会, "電力ケーブル技術ハンドブック", 昭和49年.
- [3] 한국전력공사, "지중송전 설계기준 1699(부록)", 1997.
- [4] 한국전력공사, "지중전력케이블 지중송전실무 I", 제5권, 1995.
- [5] 한국전력공사, "변전설비 예방정비 사례집(II)", 1996
- [6] 한국전력공사, "변전선설 설계", 1997
- [7] 한국표준협회, "한국산업규격", KS M 2002, 부속서3, 1991.
- [8] 한국전력공사, "345kV 북부산-남부산 지중송전케이블 공사", 1998
- [9] 효성중공업, "765kV 전력용변압기 사양서", 1998
- [10] 한국전력공사, "한전표준규격", ESB 140 - 315~434, 1995
- [11] 物理學研究會 編譯, "大學一般 物理學", 尙學堂, 1993