

EMTP를 이용한 Pre-strike 모델링에 관한 연구

여상민
성균관대학교

서훈철
기초전력연구원

김철환
성균관대학교

유영식, 조범선
한국전력거래소

A Study on Modeling of Prestrike using EMTP

S.M. Yeo
Sungkyunkwan Univ.

H.C. Seo
KESRI

C.H. Kim
Sungkyunkwan Univ.

Y.S. Lyu, B.S. Cho
KPX

Abstract - 차단기, 단로기와 같은 개폐기는 투입 동작이 이루어질 때, 절점 간의 내전압과 양단간의 전압차 사이의 관계에 의하여 pre-strike 현상이 발생한다. 따라서, 개폐기가 투입되는 동안 발생하는 과도현상을 파악하기 위해서는 개폐기의 pre-strike 현상을 모델링하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 개폐기의 pre-strike 현상을 EMTP로 모델링하고 이를 모델 계통에 적용하여 구현된 pre-strike 모델이 타당함을 보였다.

1. 서 론

전력계통에는 다양한 과도현상이 존재한다. 그 중 각종 스위칭 동작에 의한 스위칭 과도현상은 매우 중요한 연구 분야 중 하나이다. 이러한 스위칭 과도현상의 종류로는 선로의 가압, 무압, 고장의 제거 등을 볼 수 있으며, 계통의 형태, 계통 정수, 스위칭 동작의 발생 시점 등의 다양한 변수에 의해 변화한다.

스위칭 과도현상을 해석하는데 있어 일반적으로 개폐기는 이상적인 스위치를 사용하여 모델링이 이루어지며, 필요에 따라 통계적인 스위치를 적용하기도 한다. 이러한 개폐기의 중요한 특징 중 하나는 개폐기를 투입하는 동안 발생하는 pre-strike 현상이다. Pre-strike 현상은 개폐기가 투입될 때 개폐기 절점 간의 간격이 점차 좁아지면서 발생하는 현상으로, 개폐기 절점 간의 절연강도가 절점 사이의 전압보다 작아질 때 절점 사이에서 방전이 일어나며, 전기적으로 두 절점이 등전위가 되는 현상을 말한다. 따라서, pre-strike 현상은 각종 개폐기의 투입 조작시 발생하는 과도현상을 분석하기 위해서는 반드시 모델링을 통한 적용이 있어야 한다[1-5]. 특히 차단기의 경우 투입시간이 매우 짧아 투입시 과도현상이 큰 영향을 미치지 않으므로 이상적인 스위치에 의한 모델링과 큰 차이가 없으나, 단로기와 같이 투입 시간이 긴 개폐기의 경우, 투입 시간 동안 여러 차례의 pre-strike가 나타나며, 차단기에 비해 상대적으로 긴 시간 동안 스위칭 과도현상을 나타내게 된다[1-3].

본 논문에서는 전자기 과도 현상 해석 프로그램인 EMTP(Electro-Magnetic Transients Program)을 사용하여 개폐기의 Pre-strike 모델을 구현하고자 한다.

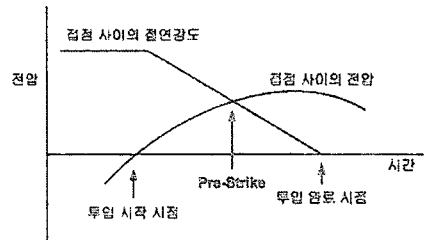
2. Pre-Strike

2.1 개폐기의 Pre-strike 현상

일반적으로 EMTP-RV와 같은 과도현상 프로그램에서의 개폐기 모델링은 이상적인 스위치로써, 임의의 시간에 투입될 수 있도록 표현된다. 그러나 현실에서는 개폐기 절점이 투입되기 시작하는 시점과 개폐기 투입이 완료되는 시점 사이에는 시간차가 존재하며 이를 투입 시간(closing time)이라고 한다. 이 투입 시간 동안 절점

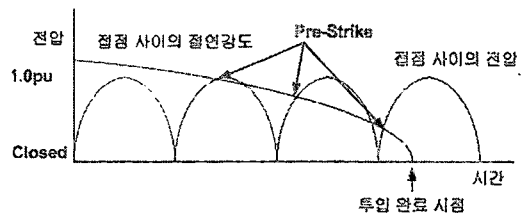
사이에서는 아크가 발생할 수 있다. 이 현상을 pre-strike라고 하며, 개폐기의 절점 사이의 거리, 절점의 기하학적 구조, 절연물의 압력과 특성 등에 따라 다양하게 변화한다. 특히 차단기와는 달리 투입 시간이 긴 단로기의 경우, 단로기가 투입되는 동안 수차례의 pre-strike가 발생하게 된다. 따라서, 단로기의 pre-strike 현상은 본 연구에서 다루고자 하는 GIS 내에서의 단로기 개폐 과전압에 의한 영향 분석에 있어 필수적인 요소라고 볼 수 있다[1].

개폐기에 투입 지령이 내려지게 되면, 개폐기의 두 절점(고정절점, 가동절점)은 점차 가까워진다. 가동절점이 고정절점을 향하여 이동함에 따라, 두 절점 간의 거리는 짧아지며, 동시에 절점 사이의 절연 강도는 감소하게 된다. 이 때, 절점 사이의 절연 강도가 절점 양단의 전압차보다 작아지게 되면, 절점 사이에서는 절연파괴에 의한 아크가 발생하고, 두 절점은 전기적으로 등전위가 되며 이때 전기적인 투입이 발생하였다고 하며 이 현상을 pre-strike라고 한다. 이러한 pre-strike 현상에 의하여 기계적인 투입이 발생하기 이전에 전기적인 투입을 선행하게 된다. 다음 그림 1은 이와 같은 절점 간의 절연 강도와 단자 전압 간의 관계를 나타낸 것이다[1-3].



(그림 1) 절연강도와 단자전압 간의 관계

단로기의 경우, 긴 투입 시간에 의하여(GIS의 단로기의 경우 수백ms에서 수초) 여러 차례의 pre-strike가 발생하며, 이를 절연강도와 단자전압의 관계로 표시하면 다음 그림 2와 같이 표현할 수 있다.



(그림 2) 단로기에서의 절연강도와 단자전압의 관계

pre-strike가 발생하게 되면, 발생된 아크에 의한 과전압이 나타나게 되며, 3상 스위치의 경우, 각 상에서 발생한 아크가 서로 영향을 주게 된다. 또한 각 상에서는 서로 다른 시점에서 pre-strike가 발생함에 따라 3상 전압의 불평형을 초래하게 된다. 그림 1, 그림 2와 같이 나타나는 개폐기의 pre-strike의 모델링은 다음과 같이 얻어진다.

먼저, 정확한 모델링 적용을 위해서는 개폐기가 개방된 상태에서의 절연강도(내전압)를 알아야 한다. 이 값은 모델링을 위해서 다음과 같이 표현한다[4,5].

- 개폐기 양단의 내전압 : $K \cdot V_r$

여기서 K 는 per-unit 단위의 개방 접점의 내전압을 나타내며, V_r 은 개폐기 양단의 최대 상 정격전압을 의미한다. 실제 접점 사이의 절연물에 대한 절연 강도는 상수로 정해지지 않으며, 다양한 변수에 의한 영향으로 변화한다. 그러나 모델링을 위해서 절연물의 내전압은 상수로 유지되는 것을 가정한다.

다음으로 중요한 변수는 개폐기의 투입 시간(T_c)이다. 투입 시간과 관련하여 개폐기 접점은 t^2 에 따라 투입되며, 여기서 t 는 접점이 투입되기 시작한 순간부터 측정된 시간을 의미한다.

개폐기의 접점 사이의 내전압이 접점 사이의 거리에 비례한다고 하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$K \cdot V_r - V_w = A \cdot t^2$$

여기서,

t : 접점이 투입되기 시작한 순간부터 측정된 시간

V_w : 접점이 투입되는 동안 점차 감소하는

접점 사이의 내전압

A : 상수

위 식에 대하여 다음 두 가지의 경계조건을 적용할 수 있다.

(1) 투입이 완료된 시점($t = T_c$) : $V_w = 0.0$

(2) 투입이 시작하는 순간($t = 0$) : $V_w = K \cdot V_r$

위 경계조건을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$A = \frac{K \cdot V_r}{T_c^2}$$

따라서, 개폐기가 투입될 때 접점 간의 내전압은 다음과 같이 정리할 수 있다.

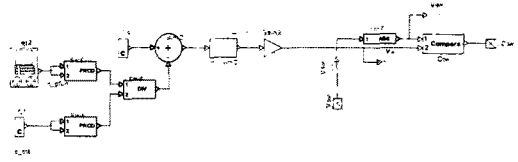
$$V_w = K \cdot V_r \left(1 - \frac{t^2}{T_c^2} \right)$$

계산된 V_w 가 개폐기 접점 사이의 측정 전압보다 작아지게 되면 pre-strike는 발생하게 된다. 따라서, 계산된 V_w 와 개폐기의 단자전압을 비교하면 pre-strike 시점을 알아낼 수 있으며, 해당 시간에 전기적인 투입이 발생하도록 모델링하여 pre-strike를 모의할 수 있다[4-5].

2.2 Pre-strike의 모델링

EMTP에서 pre-strike를 모델링하기 위해서는 V_w 를 계산하는 부분과 함께, 특정 신호를 사용하여 제어할 수 있는 controlled switch와 스위치의 단자전압을 측정하기 위한 probe가 필요하다. 다음 그림 3은 EMTP로 표현한

pre-strike 모델이다[6].

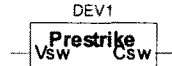


〈그림 3〉 EMTP로 구성된 pre-strike 모델

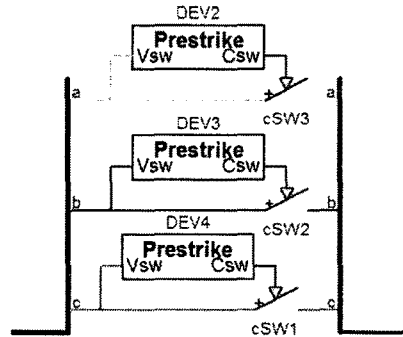
왼편 부분에서 접점 사이의 내전압, V_w 를 계산하도록 구성하였으며, 스위치 단자전압을 입력받아 계산된 내전압과 비교하도록 하였다. 최종 출력은 다음과 같다.

- (1) 내전압 > 단자전압 : -1
- (2) 내전압 = 단자전압 : 0
- (3) 내전압 < 단자전압 : 1

그림 3의 pre-strike 모델링을 보다 간편하게 사용하기 위하여 다음 그림 4와 같이 sub-circuit화하였다. 다음 그림 5는 실제 계통 모델링에 적용하기 위하여 controlled switch와 함께 구성한 것이다.

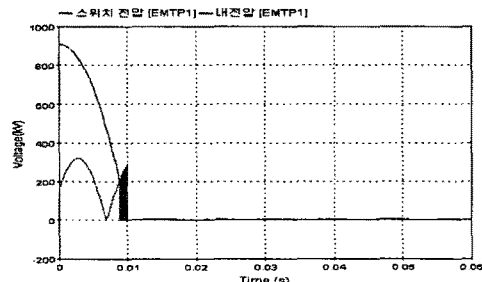


〈그림 4〉 pre-strike 모델의 sub-circuit



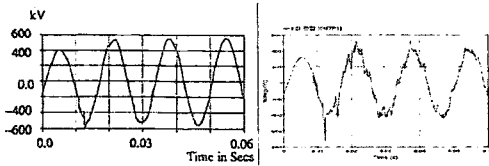
〈그림 5〉 pre-strike 모델의 3상 구성

본 논문에서는 기존의 연구 결과와 Pre-strike 모델을 비교, 검증하기 위하여 기존 문헌에 제시된 모델 계통을 구성하고, Pre-strike 모델을 적용하였다[4,5]. 다음 그림 6은 내전압과 차단기의 양단 전압을 나타낸 파형이다.



〈그림 6〉 내전압과 스위치 전압

다음 그림 7(a)는 문헌에서 제시된 b상 수전단 측의 전압 파형이고, 그림 7(b)는 본 논문에서 구현한 pre-strike 모델에 의한 전압 파형이다.



(a) 문헌의 전압 파형 (b) 모델링 결과

〈그림 7〉 문헌과의 모델링 전압 비교

그림 7(a)와 그림 7(b)를 비교하면 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, EMTP에 의한 pre-strike 모델링이 잘 이루어진 것을 확인할 수 있다.

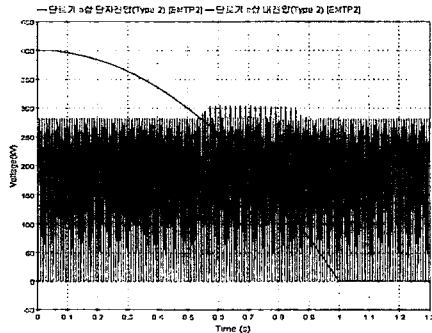
3. 시뮬레이션 및 결과

3.1 대상 계통

참고문헌 [7]에 수록된 단로기 개폐에 의한 개폐 과전압을 모의하기 위하여 앞에서와 같이 모델링된 단로기의 Pre-strike 모델을 투입된 단로기에 적용하였다. 그림 5와 같이 단로기 Pre-strike 모델을 적용하였으며, 적용된 단로기 모델이 동작할 때, 발전기 측에서 나타나는 영향을 분석하였다.

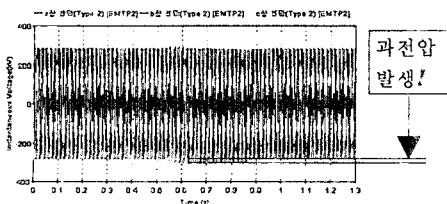
3.2 시뮬레이션 결과

다음 그림 8은 대상 계통에서 단로기 Pre-strike 모델을 적용한 결과를 보이고 있다. 단로기 내전압이 점차 감소하며, 단로기 단자전압보다 작아지게 되는 시점에서 단로기의 전기적 투입이 시작된다.



〈그림 8〉 단로기 내전압 및 단자전압 비교

그림 8에서 나타난 바와 같이 전기적 투입이 발생하는 시점에서 약간의 과전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 다음 그림 9는 발전기 측에서 측정된 3상의 전압 파형이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 발전기 측에서의 상전압은 매우 급소하게 변하는 것을 확인할 수 있다.



〈그림 9〉 발전기측 3상 전압 파형

또한, 그림 9로부터 단로기에서 발생한 개폐 과전압이 GIS를 통과하면서 감쇄되어 발전기 측에 미약한 영향만을 미치는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

차단기 또는 단로기 등의 개폐기를 투입할 때 발생하는 pre-strike 현상은 스위칭 과도현상을 모의할 때 중요한 관점 중 하나로서, 개폐기가 투입되는 동안 발생하는 과도현상을 모델링하는데 매우 중요하다.

본 논문에서는 EMTP를 이용하여 pre-strike 모델을 구현하고, 기존 연구 결과와 비교하여, 모델링이 잘 이루어졌음을 검증하였다. 또한, 대상 계통에 적용하여 단로기 개폐 과전압을 모의하였으며, 발전기 측에서의 3상 전압을 측정하여, 단로기 투입에 의한 과전압이 발전기 측의 전압에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

이와 같이 구현된 pre-strike 모델은 개폐기의 투입 시 발생하는 과도현상 특히 단로기와 같이 투입 시간이 긴 개폐기에서의 과도현상 분석에 큰 기여를 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Salih Carsimovic, Zijad Bajramovic, Miroslav Ljevak, Meludin Veledar, "Very Fast Electromagnetic Transients in Air Insulated Substations and Gas Insulated Substations due to Disconnecter Switching", International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2005. EMC 2005, Vol. 2, pp. 382-387, 8-12 Aug., 2005.
- [2] Z. Haznadar, S. Carsimovic, R. Mahmutcehajic, "More Accurate Modeling of Gas Insulated Substation Components in Digital Simulations of Very Fast Electromagnetic Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 434-441, Jan., 1992.
- [3] EPRI, "Electromagnetic Transients Program(EMTP) Workbook II", EPRI Final Report, EL-4651, Vol. 2, June. 1986.
- [4] D.A. Woodford, L.M. Wedepohl, "Transmission Line Energization with Breaker Pre-Strike", 1997 Conference on Communications, Power and Computing WESCANEX '97 Proceedings, pp. 105-108, May 22-23, 1997.
- [5] D.A. Woodford, L.M. Wedepohl, "Impact of Circuit Breaker Pre-Strike on Transmission Line Energization Transients", IPST '97, Seattle, pp. 250-253, June 22-26, 1997.
- [6] DCG-EMTP(Development coordination group of EMTP) Version EMTP-RV, Electromagnetic Transients Program. [Online]. Available : <http://www.cmt.com>.
- [7] 여상민, 서훈철, 김철환, 유영식, 조범섭, "발전기 및 주변압기 연계계통의 송전선로 과전압 발생시 제어회로 모델링 및 분석", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 588-589, July, 18-20, 2007.