

배전계통 HIF 아크 모델 분석 및 직접 적분법 적용 방법론에 대한 연구

고윤석*

The Analysis of the HIF Arc Model of the Distribution System and
the Methodology of the Application of Direct Integration Method

Yun-Seok Ko*

요 약

배전계통에서 고임피던스 고장(HIF : High Impedance Fault) 판단의 신뢰성을 높이기 위해서는 무엇보다 HIF의 특징을 정확히 나타낼 수 있는 HIF 모델을 얻는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 아크모델을 기반으로 하는 수개의 HIF 모델들을 검토하여 그 특징들을 비교, 분석한다. 또한, 직접 적분법을 적용하여 HIF 특징을 가지는 아크모델을 구현하는 방법론을 연구한다.

ABSTRACT

In distribution system, to enhance the reliability of a HIF (High Impedance Fault) determination, it is very important to obtain the HIF model which can represent accurately the HIF characteristics. Accordingly, in this paper, the several HIF models which are based on the arc models are reviewed, and then the characteristics of the HIF models are compared from the reviewed results. Finally, a Methodology implementing the arc model is studied based on the direct integration method.

키워드

Distribution System, Arc Model, HIF(High Impedance Fault), Direct Integration Method

1. 서론

배전계통 분야에서 고 임피던스 지락 고장 (HIF : High Impedance Fault)은 검출상의 어려움과 재산은 물론 인명피해 같은 심각한 파급효과 때문에 수십년 동안 연구개발의 주요 주제였다. HIF 판단의 신뢰성을 높이기 위해서는 다양한 고장위치, 부하조건하에서 발생하는 HIF에 대한 전압, 전류 파형들을 얻는 것이 중요하지만, 현실적으로 이들 파형들을 실제 시스템으로부터 얻는 것은 불가능하다.

이에 반해 EMTP/ATPDraw는 시뮬레이션을 통해 다양한 배전계통 구성 하에서 다양한 부하조건하의 HIF 아크 전압, 전류 파형을 얻는 것이 가능한 장점을 가진다. 이러한 장점 때문에 지금까지 대부분의 연구자들이 이 방법론에 근거를 두어 HIF 특성을 해석하였는데, 특히 HIF 판단의 신뢰성이 얼마나 실제 HIF의 특성에 근접한 모델들을 얻을 수 있는냐에 좌우되기 때문에 정확한 HIF 모델들을 얻기 위한 연구가 활발하게 수행되었다[1-7]. 그러나 이들은 방법론적으로 차이점을 보이기 때문에 유효한 HIF 아크 모델

* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과(ysko@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2011. 05. 12

심사(수정)일자 : 2011. 05. 18

게재확정일자 : 2011. 06. 15

을 얻기 위해서는 제안된 모델들에 대한 특징과 방법론을 살펴볼 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 참고문헌 [1-7]에서 제안된 수개의 HIF 모델을 분석하여 그 방법론을 이해하고 특성별로 분류하며, 직접 적분법을 적용하여 아크모델을 구현하는 방법론을 제시한다.

II. 배전계통 HIF 정의

배전계통은 고밀도 부하지역은 물론 수목지를 폭넓게 경유하기 때문에 잦은 선로고장을 경험하며 그 중 상당수는 HIF에 해당한다. 그림 1은 HIF를 경험하는 전력계통의 구성을 보인다.

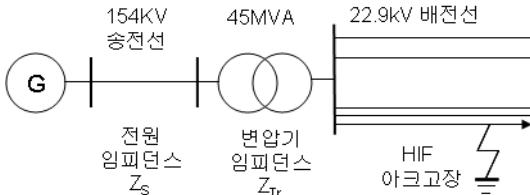


그림 1. HIF를 경험하는 전력계통 구성
Fig. 1 Power system configuration with a HIF

배전계통에서 발생하는 아크고장인 HIF는 2가지 타입으로 구분될 수 있다[2]. 첫 번째 타입은 전력 공급중인 전선이 단선되어 지표면에 떨어져, 정상적인 전압레벨로 전력이 공급되지만 계통으로부터는 분리되는 경우이다. 이때 접촉되는 토지가 단선된 상의 부하가 되고, 물질의 타입에 따라 가변량의 전류가 고장경로를 따라 지표로 흐르게 되는데, 그라운드에 대한 새로운 패스가 높은 임피던스를 보이기 때문에 흐르는 전류가 매우 적다. 두 번째 타입은 전선 도체가 전력이 정상적으로 공급되고 있고, 네트워크에 연결되어 있으며, 부하에 전력을 공급하고 있는 상태에서 인근 물체와의 실제적 접촉을 보이는 경우이다. 이것은 모니터링 장비에 부하전류의 작은 변화처럼 보인다. 기존의 보호기에서 0-100A사이의 부하전류의 증가는 HIF 조건이거나 부하수요의 변화일 수 있기 때문에, 크기 외에 전류파형의 다른 패턴(시그네이처)가 없는 한 HIF와 부하사이를 구별할 수 있는 방법은

없다. 이때, 시그네이처들은 아크 전압, 전류의 변화를 분석함으로써 얻을 수 있다.

III. 배전계통 아크 모델 분석

아크모델은 절연성 회복(dielectric recovery)에 근거를 둔 모델과 열적 특성들에 근거를 모델로 구분될 수 있다.

3.1 Kizilcay의 아크 모델

열적 모델은 Cassie와 Mayr이 1차 미분방정식의 형태로 처음 아크 전도성 표기를 도입한 이후, 오랫동안 동적아크모델의 기본이 되어왔다. 전력계통의 한 분야인 송전계통(EHV System)에도 최근 동정 방정식을 이용한 2개의 아크 고장모델들 즉, Kizilcay 모델과 Johns 모델이 제시되었는데, 특히, Kizilcay 모델은 실험적으로 그 유효성이 검증됨으로서 높은 신뢰성을 보장한다[2,4].

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G-g) \quad (1)$$

여기서, τ : 아크 시간상수
 g : 순시 아크 콘덕턴스
 G : 고정 아크 콘덕턴스

Kizilcay의 아크고장 모델은 식 (1)과 같다. 고정 아크 콘덕턴스 G 는 식 (2)로 정의된다.

$$G = |i_{arc}| / u_{st} \text{ with } u_{st} = (u + r|i_{arc}|)l \quad (2)$$

여기서, i_{arc} : 순시 아크 전류
 u_{st} : 고정 아크 전압
 u : 단위 길이당 아크 전압
 r : 단위 길이당 아크 저항
 l : 시간중속 아크 길이

배전계통(MV네트워크)에 적용하기 위해서는 송전 시스템(EHV시스템)에서 제안된 파라미터들이 수정되어야 한다. u_0 와 r_0 는 상수가 아니라 아크길이에 의존적 이므로 식 (3), (4)로 계산된다.

$$u_0 = ul = 0.9 + \frac{kV}{m} \cdot l + 0.4kV \quad (3)$$

$$r_0 = rl = 40 + \frac{m\Omega}{m} \cdot l + 8m\Omega \quad (4)$$

시간상수 τ 는 식 (5)로 수정될 수 있다.

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{l}{l_0}\right)^\alpha \quad (5)$$

여기서, τ_0 : 초기 아크 시간상수
 l_0 : 초기 아크 길이
 α : 음의 계수

3.2 Zamanan의 모델

절연성 회복에 근거한 아크의 이론과 전압전류의 동적 특성에 대한 모델을 얻기 위한 많은 연구들이 있었는데, 참고문헌 [6]에서는 스파크 갭을 이용하여 이러한 현상에 대한 유효 모델을 제시한다. 그림 2는 스파크 갭을 이용한 아크 전압-전류의 동적 특성을 보인다.

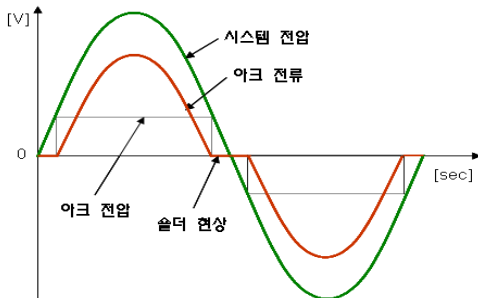
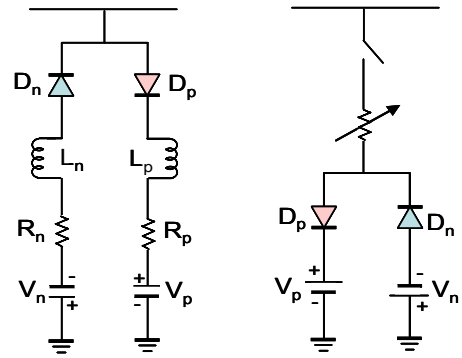


그림 2. 전기아크 전압-전류 모양
 Fig. 2 Electric arc voltage and current shapes

그림 2에 보인바와 같이 에어 갭은 인가전압이 절연 파괴전압에 도달할 때까지 도전하지 못하다가 인가전압이 아크전압과 같아질 때부터 전류가 흐르기 시작하여 최고점에 도달했다가 감소하여 영점 부근에 도달하게 된다. 그리고 소화가 일어날 때, 재 발화를 위해서 아크는 재 파괴전압으로 알려진 전위를 요구한다. 이 재 발화는 반대극성을 가진다. 그림 3의 (a)

는 그림 2에 근거하여 개발된 Zamanan 모델을 보인다.



(a) Zamanan 모델 (b) Sheng 모델

그림 3. Zamanan 모델과 Sheng 모델
 Fig. 3 Zamanan model and Sheng model

HIF 모델은 2개의 DC 소스들을 포함한다. 이것은 흠 또는 수목과 배전선상에서의 아크 전압을 표시한다. 다이오드와의 2개의 저항은 나무 또는 지표면 저항을 표시한다. 그리고 대부분 관측된 아크들이 극히 유도적인 회로에서 발생하기 때문에 두 개의 인덕턴스가 회로에 추가된다. 인덕턴스의 효과는 전압-전류 커브에서 비선형적인 루프형상을 주고, HIF 전류에 요구된 비대칭적 형상을 준다. 고장전류는 라인 전압이 (+)DC 전압보다 클 때 그라운드로 흐르기 시작하고 라인 전압이 (-)DC 전압보다 작을 때 그라운드로부터 역으로 흐른다. 라인전압이 V_p 와 V_n 사이에 있을 때 라인전압은 고장전류가 흐르지 않도록 V_p 와 V_n 사이에서 균형을 잡게 된다.

3.3 Sheng의 모델

그림 3의 (b)는 Sheng 모델[3]을 보인다. 이 모델에서는 앞의 경우와 달리 한 개의 비선형 저항과 두 개의 다이오드 그리고 반주기마다 불규칙적으로 크기를 바꾸는 두 개의 DC 소스들로 구성된다. DC 소스 전압크기의 평균 및 표준 편차의 변화가 아스팔트, 모래 그리고 잔디 같은 지표면을 더욱 근접하게 근사화시키기 위해 이용될 수 있다. 이와 같이 이들 요소들을 이용하여 더욱 동적이고 불규칙적인 HIF 모델을 표시한다.

3.4 Michalik의 모델

이 모델[5]은 기존 모델과는 다르게 그림 4의 (a)에 보이바와 같이 Kizilcay의 동적 아크 모델과 다이오드 기반의 아크 모델이 결합된 형태를 보인다. 아크 모델은 그라운드 경로 저항을 표시하는 비선형 저항 R_a , 동적 아크를 표시하는 비선형 시변 저항 $r(t)$ 는 물론, DC와 AC 소스들을 표시한다. DC소스들은 아크전압과 전류들의 비대칭성을 보장하며, AC소스들은 가변 아크발화와 소화순간을 보장한다. 다이오드들과 극성을 가진 램프 전압들이 아크발화순간을 제어하기 위해 이용된다.

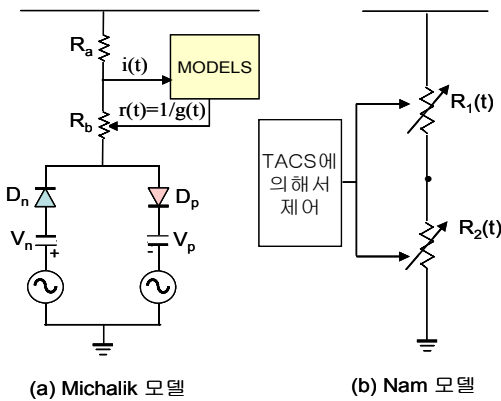


그림 4. Michalik 모델과 Nam모델
Fig. 4 Michalik model and Nam model

3.5 Nam의 모델

이 모델[1]은 기존 방법들과는 달리 22.9kV 배전계통에 대한 인공 아크고장 실험을 통해 수집된 10kHz의 전압, 전류 데이터를 기반으로 한다. 이때, HIF 모델은 HIF의 비선형성, 비대칭성, 빌드-업 그리고 솔더 특성들을 표시하기 위해서 식 (6)과 같이, 2개의 시변 직렬저항으로 표시된다. 식 (6)에서 $R_1(t)$ 는 비선형성과 비대칭성을 표시하며 정상상태동안 매 주기마다 같은 특성들을 가지는 즉, 주기적인 특성을 가진다.

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) \quad (6)$$

반면에 $R_2(t)$ 는 빌드업과 쇼울더를 표시하며 HIF의 초기에는 큰 값을 가지다가 과도상태에서 점점 줄어들어 정상상태에서는 영이 된다. 그림 4의 (b)는

TACS(Transient Analysis of Control Systems) 에 의해서 제어되는 2개의 시변저항을 기반으로 하는 HIF 모델을 보인다.

3.6 아크모델의 분류

HIF 모델들은 앞에서 분석된 결과를 기반으로 표 1과 같이 분류될 수 있다.

표 1. 아크모델의 분류
Table 1. The classification of arc models

#	분류	문헌	특징
1	열적 모델	[2],[4],[7]	절연 회복의 경우에 비해 아크의 동적특성 해석에 유리, MODELS로 구현
2	절연 회복 모델	[3]	DC 소스들을 이용하여 아스팔트, 모래, 잔디 같은 지표면 사이의 아크 전압을 표시
		[6]	DC 소스외에 두 개의 인덕턴스 소자를 추가하여 아크시의 극히 유도적인 회로특성을 나타냄
3	복합 모델	[5]	열적 모델과 절연회복 모델을 결합한 모델로서 DC소스외에 AC소스들을 추가하여 가변 아크발화와 소화순간을 보장
4	실증 모델	[1],[2]	실증시험을 통해 얻어진 두 개의 시변 저항을 통해 보다 실제적인 아크 특성을 표시함

IV. 열적 아크 모델 시뮬레이션

앞의 연구결과들은 열적 아크 모델이 아크의 동적 특성 해석에 유리하다는 것을 보인다. 따라서 본 연구에서는 직접 적분법을 적용하여 열적 아크 모델을 구현하고 이를 기반으로 한 기본적인 아크 고장을 그림 5에 보인 시험 배전계통에 대해서 모의한다. 열적 아크모델과 이를 기반으로 하는 배전계통 HIF 고장모의는 비주얼 C++ 언어를 이용하여 구현되었다.

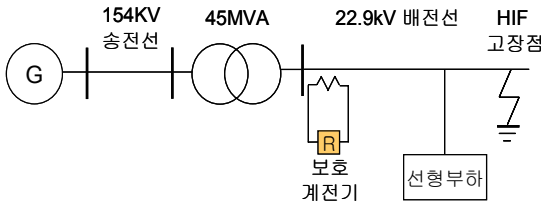


그림 5. 시험배전계통
Fig. 5 Test distribution system

열적 아크 모델을 직접 적분법으로 표시하면 식 (7)과 식 (8)로 표시될 수 있다.

$$g'(t) = -\frac{1}{\tau}g(t) + \frac{1}{\tau}G(t) \quad (7)$$

$$g(t + \Delta t) = g'(t) \times \Delta t + g(t) \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 반복적으로 적용함으로써 순시 콘덕턴스의 변화를 추적할 수 있으며, 이 결과로부터 다양한 아크 정보를 확인할 수 있다.

그림 6은 고장점에서의 아크 전압을 표시한다. 반면에 그림 7은 그림 6에 보인 아크전압에 대해 직접 적분법에 의해서 구한 순시 아크 콘덕턴스 g 의 변화를 보인다.

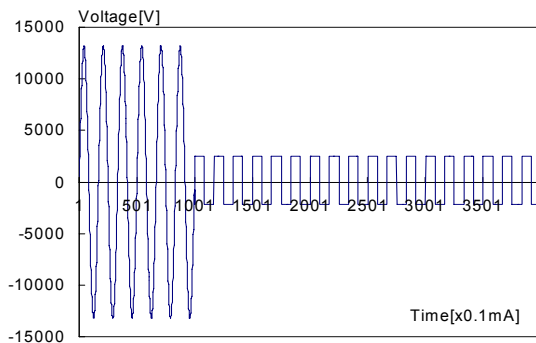


그림 6. 고장점 아크 전압
Fig. 6 Arc voltage at HIF fault position

시뮬레이션 결과로부터 얻어진 고장점에서의 아크 전류와 보호계전기 단에 흐르는 전류는 그림 8과 그림 10에 보인다. 그림 12는 그림 11의 아크 전류 중 300에서 400[ms]까지의 구간을 확대해 보인 그림인

데, 아크 전류의 대표적인 특징인 비대칭성과 솔더 특징이 잘 표시됨을 확인할 수 있다.

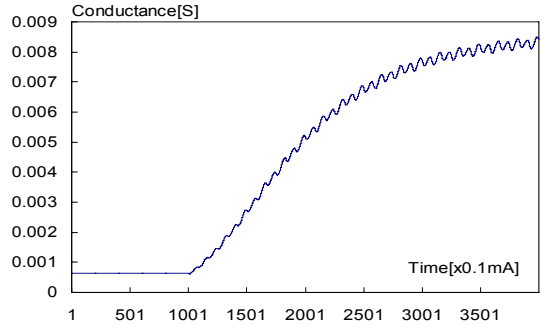


그림 7. 아크 콘덕턴스의 변화
Fig. 7 The variation of the arc conductance

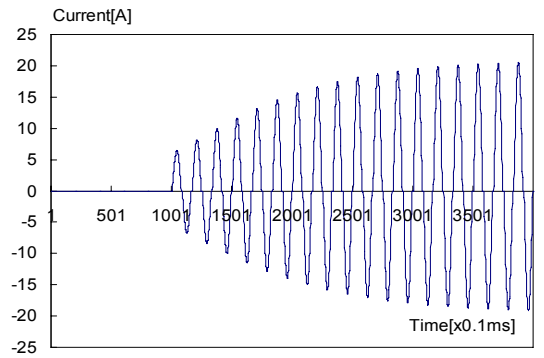


그림 8. 고장점 아크 전류
Fig. 8 Arc current at HIF fault position

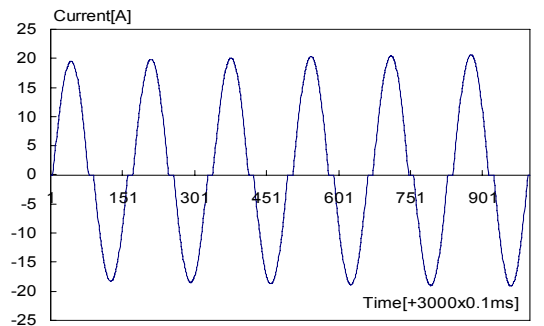


그림 9. 아크 전류의 특성들
Fig. 9 The characteristics of the arc current

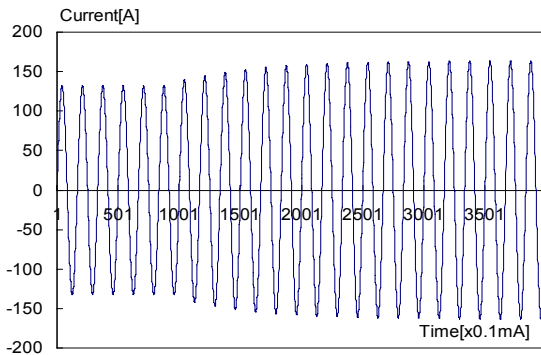


그림 10. 보호계전기에 흐르는 전류
Fig. 10 Current at protective relay position

V. 결론

본 연구에서는 HIF 아크모델들을 비교, 분석하였다. 분석결과로부터 각 모델들은 모델별로 특히, 절연 회복 모델들의 경우 구성요소를 서로 달리함으로써 아크 전압, 전류의 동적 특성에 다소 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한 직접 적분법을 열적 모델에 적용하여 열적 아크 모델을 구현하고 HIF 사고를 모의함으로써 HIF 특성 분석을 위한 기본 방법론을 확립하였다. 따라서 차후 확립된 기반 기술을 기반으로 배전계통 HIF 분류기 설계연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 남서울대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang, T. H. Kim, "Modelling of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP, " Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE-SM, Vol. 2, pp. 1175-1180, 2001.
[2] F. M. Uriarte, "Modeling, Detection, and Localization of High Impedance Faults in

Low-Voltage Distribution Feeders", Dec., 2003,
[3] Y. Sheng and S. M. Rovnyak, "Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 533-536 Apr., 2004.
[4] M. Kizilcay and P. La. Seta, "Digital Simulation of Fault Arcs in Medium-Voltage Distribution Networks", 15th PSCC, Liege, pp. 22-26, Aug., 2005.
[5] M. Michalik, W. Rebizant, M. Lukowicz, S.-Jae Lee, and S.-Hee Kang, "Wavelet Transform Approach to High Impedance Fault Detection in MV Network", IEEE Power Tech., pp. 1-7, Jun., 2005.
[6] Naser Zamanan and Jan K. Sykulski, "Modeling an Arching High Impedance Fault based on the Physical Process Involved in the ARC", Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, Sep., 2006.
[7] N. I. Elkalashy, "Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks", Apr., 2007.

저자 소개



고윤석(Yun-Seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사).

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원

1996년~1997년 포스코 경영연구소 연구위원

1997년~현재, 남서울대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 스마트그리드, 배전자동화, 변전소 자동화, 스마트 분전반, 로봇제어