지중 전력 케이블 가압 상태 진단

Identifition of Energized status of Underground Power Cable

김 창 교* · 홍진수** · 정영호***
(Chang Kyo Kim, Jin Soo Hong and Yeung Ho Jeong)

Abstract

A study to identify the energized status of the 22.9kV underground power cable by the detection of vibration was performed. We derived that there exists vibration at double the line frequency in live cables by electromagnetic force. The vibration can be picked up by accelerometer sensor. A prototype was tested on the underground distribution system in Chonan Station, KEPCO. The results are presented and suggest the applicability of the detecting device.

Key words(중요 용어) : Cable, Electromagnetic force, Energized ststus

1. 서 론

복잡한 도심지역에 전기에너지를 공급하기 위하여 지중관로를 이용하는 것이 필수적으로 되어가고 있다. 지중관로에서는 전기공급을 위한 도체로서 케이블을 사용하고 있다. 유지보수를 위해서 케이블의 손상된 부분을 교체하기 위하거나 또는 케이블을 잘라 내는 일이 필요하다[1]. 이 때 제일 중요한 문제는 안전 문제를 최우선적으로 고려해야 한다는 것이다. 지중 전력구 내에 여러개의 전력 케이블이 존재하고 있기 때문에 전력 케이블 작업중에 여러개의 활선 전력 케이블 중에서 사선 전력 케이블을 찾아내는 것은 작업의 안전성 및 신속성, 용이성 면에서 매우 중요한 것으로 알려져 있다. 케이블의 가압 여부를 판단하는 방법에서 가장 많이 알려져 있는 것은 다음 세가지로 알려져 있다. 첫째 방법은 가압 여부를 판별하는 가장 오래되고 간단한 방법으로 케이블에 표시를 하는 방법이나 관로에 번호를 매겨서 회로를 파악하는 방법이다. 그러나 이방법은 관로안에 많은 케이블이 존재할 때 이를 표시하기에 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 많은 인건비가 소요되므로 고비용이 요구된다고 알려져 있다[2]. 두 번째 방법으로 이용되는 방법으로는 케이블을 30cm정도를 절개한 다음에 케이블이 가압되어 있으면 적절한 기구를 삽입하여서 가압상태를 측정하는 것이다[3]. 이 방법의 문제점은 케이블을 절개해야 하고, 이때 전기 공급을 중단해야 하는 것이다. 세 번째 방법으로는 케이블의 가압상태를 판단할 수 있는 지점에서 케이블을 통하여 통신신호를 보내서 작업 구간에서 이를 수신하여 가압상태를 판단하는 방법이다. 그러나 이 방법은 이 기간 동안에 전력공급을 중단하여야 하는 문제를 갖고 있다.

본 연구에서는 부하의 존재여부와 관계없이 케이블의 손상없이 전력 케이블의 활선 또는 사선 여부를 확인할 수 있는 비파괴 케이블 가압 상태 측정 시스템의 개발 가능성을 확인하고자 하는 기초연구를 수행하였다. 본 연구에서는 케이블의 가압 여부를 판단하기 위한 모의시험을 하였고 현장 실험은 한국전력공사 천안변전소에서 행하였다.

* : 순천향대학교 전기공학과
(충남 아산시 신창면 읍내리, Fax:0418-530-1333)
** :순천향대학교 물리학과
***: 한국전력공사 전력연구원

2. 이론적 배경 및 모의 시험

가압 상태에 있는 케이블에서 케이블이 부하에 연결되어 있는지에 관계없이 전자기 힘에 의하여 발생한 진동이 120Hz의 주파수를 갖고 있는 것으로

예상할 수 있다. 두개의 도체에 전류 i_1가 i_2가 흐르고 있을 때 두 도체사이에 작용하는 단위길이당 힘은

$$F_{12}=\frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi r} \tag{1}$$

여기서 r 은 두 도체 사이의 거리이다. 이상적일 때 차폐선을 갖지않은 3상 케이블의 경우에 상황은 유사하다. 그림 1은 도체 사이의 거리가 r이고 3상 도체를 보여주고 있다. 이 때 3상 전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_1 &= I_1\cos\omega t \\ i_2 &= I_2\cos(\omega t-\theta) \\ i_3 &= I_3\cos(\omega t+\theta) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 θ 는 120° 이고 각 전류의 위상각을 나타낸다.

각 도체로 부터 케이블의 중앙 방향으로 작용하는 힘은 각 도체사이에 작용하는 힘을 기하학적으로 풀어서 해를 얻을 수 있다. 다음은 중앙으로 작용하는 힘을 나타낸다.

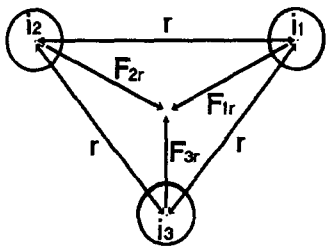

그림. 1 Forces on a Single Conductor in a 3-Phase Cable Arrangements

$$\begin{aligned} F_{1r} &= -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}[2\cos\theta+\cos(2\omega t-\theta) \\ &\quad +\cos(2\omega t+\theta)] \\ F_{2r} &= -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}[\cos\theta+\cos(2\theta) \\ &\quad +\cos(2\omega t-\theta)+\cos(2\omega t)] \\ F_{3r} &= -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}[\cos\theta+\cos(2\theta) \\ &\quad +\cos(2\omega t+\theta)+\cos(2\omega t)] \end{aligned} \tag{3}$$

각 도체로부터 중심방향으로 작용하는 힘에 의한 변위는 다음 운동방정식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\vec{r_i}=\vec{r_{0i}}+\vec{v_{0i}}\,t+\frac{1}{m}\int\left(\int\vec{F_{ir}}\,dt\right)dt \tag{4}$$

여기서 r_i는 변위 진폭이고, r_{0i}는 변위 진폭의 초기값이고 v_{0i}는 속도의 초기값이다. 식 (4)를 이용하여 얻은 각 도체의 변위 진폭은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= r_{01}+v_{01}t-\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r m}\Big[\cos\theta\cdot t^2 \\ &\quad -\frac{1}{4\omega^2}\cos(2\omega t-\theta)-\frac{1}{4\omega^2}\cos(2\omega t+\theta)\Big] \\ r_2 &= r_{02}+v_{02}t-\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r m}\Big[\cos\theta\cdot t^2+\cos(2\theta)\cdot t^2 \\ &\quad \frac{1}{4\omega^2}\cos(2\omega t-\theta)-\frac{1}{4\omega^2}\cos(2\omega t)\Big] \\ r_3 &= r_{03}+v_{03}t-\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r m}\Big[\cos\theta\cdot t^2+\cos(2\theta)\cdot t^2 \\ &\quad -\frac{1}{4\omega^2}\cos(2\omega t+\theta)-\frac{1}{4\omega^2}\cos(2\omega t)\Big] \end{aligned} \tag{5}$$

변위 진폭은 출력이 주기 함수인 시스템에서는 가속도에 비례하게 된다. 그러므로 여기서 가속도 센서를 이용하여 케이블의 진동신호를 감지할 수 있다.

많은 면에서 전압에 의한 힘은 전류에 의한 힘과 유사하다. 전압 V가 두개의 평행 도체사이에 인가되어 있을 경우에 도체사이에 단위길이당 인력은 다음과 같다.

$$F_V=\frac{1}{2}V^2\frac{dC}{dr} \tag{6}$$

여기서 C는 두도체 사이의 단위길이당 캐패시턴스이고 r은 두도체 사이의 거리를 나타낸다.

단위길이당 캐패시턴스가 $C=\pi\varepsilon_0\varepsilon_r/\ln(r/R)$F/m 이기 때문에 전압 V에 의한 도체사이의 힘은

$$F_V=\frac{1}{2}V^2\frac{\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_r}{\left(\ln\frac{r}{R}\right)^2}\frac{1}{r} \tag{7}$$

여기서 r은 도체사이의 거리이고 R은 도체의 반경이다. 이 때 전류에 의한 힘과 전압에 의한 케이블 사이 의 비는 다음과 같다.

$$\left|\frac{F_V}{F_I}\right|=\frac{\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_r}{\mu_0}\left(\frac{V}{I\cdot\ln\left(\frac{r}{R}\right)}\right)^2 \tag{8}$$

천안 변전소에서 측정한 배전 케이블 경우에 V = 22.9kV; I = 200A이고 r = 4R이므로 식 (8)을 이용하여 구한 F_v/F_i = -0.9488이다. 여기서 F_i 전류에 의한 힘이다. 이 때 전류에 의한 힘과 전압에 의한 힘은 반대 방향의 힘을 갖는다.

차폐선을 갖는 3상케이블을 생각하자. 차폐선은 다중 접지선으로 이용되었다. 각 케이블 사이의 부하의 불평형으로 인하여 접지선으로 이용된 차폐선에 전류가 흐른다. 이 때 중심 도체에 흐르는 전류와 차폐선에 흐르는 전류의 방향은 반대이다. 그러

므로 그들 사이에는 척력이 작용하고 있다. 여기서는 차폐선에 흐르는 전류는 중심도체에 흐르는 전류의 1/6이라고 가정하였다. 중심도체와 차폐선 사이의 척력에 의한 변위 진폭은 식 (3)과 (4)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$r_{1r(s)} \propto -\frac{\mu_0 I^2}{96\pi\omega^2 L}\cos(2\omega t)$$

$$r_{2r(s)} \propto -\frac{\mu_0 I^2}{96\pi\omega^2 L}\cos(2\omega t-2\theta) \qquad (9)$$

$$r_{3r(s)} \propto -\frac{\mu_0 I^2}{96\pi\omega^2 L}\cos(2\omega t+2\theta)$$

여기서 L 은 케이블의 반경이다.

이 때 차폐 케이블에 흐르는 방향을 고려한 실제 전류는 5/6 I_1, 5/6 I_2와 5/6 I_3이다. 그러므로 각 도체에 흐르는 전류에 의한 각도체의 중심방향으로 작용하는 힘에 의한 상대 변위 진폭은 다음과 같다.

$$r_{1r(i)} \propto \frac{\mu_0\left(\frac{5I}{6}\right)^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{4\omega^2}[\cos(2\omega t-\theta) + \cos(2\omega t+\theta)]$$

$$r_{2r(i)} \propto \frac{\mu_0\left(\frac{5I}{6}\right)^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{4\omega^2}[\cos(2\omega t-\theta) + \cos(2\omega t)] \qquad (10)$$

$$r_{3r(i)} \propto \frac{\mu_0\left(\frac{5I}{6}\right)^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{4\omega^2}[\cos(2\omega t+\theta) + \cos(2\omega t)]$$

F_V/F_I=-0.9488이기 때문에 도체에 전류가 흐르지 않을 때 도체 사이의 단지 전압에 의한 도체의 중심방향으로 작용하는 힘에 의한 상대 변위 진폭은 다음과 같다.

$$r_{1r(v)} \propto -a\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{4\omega^2}[\cos(2\omega t-\theta+2\phi) + \cos(2\omega t+\theta+2\phi)]$$

$$r_{3r(v)} \propto -a\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{4\omega^2}[\cos(2\omega t+\theta+2\phi) + \cos(2\omega t+2\phi)]$$

$$r_{2r(v)} \propto -a\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{4\omega^2}[\cos(2\omega t-\theta+2\phi) + \cos(2\omega t+2\phi)] \qquad (11)$$

여기서 ϕ는 전압과 전류사이의 위상차이다.

다음은 차폐선을 갖는 케이블의 세가지 경우에 대하여 생각하여 보자.

2.1 가압상태에서 부하와 연결되어 있는 경우

진동의 진폭은 방정식 (9), (10)과 (11)로 부터 계산한 값들의 중첩을 통하여 얻을 수 있다. 그림 2는 가압 상태에서 부하와 연결되어 있는 경우의 상대 진동 진폭을 나타낸다. 이 때 peak값은 1.5이다.

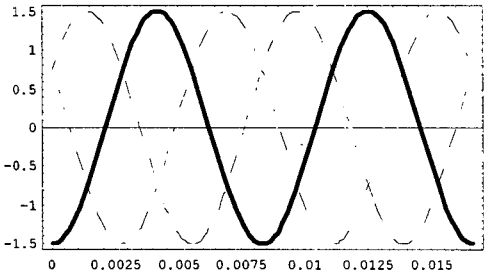

그림. 2 Relative Amplitude of Cable Vibration for Live Feeder Carrying a Current

2.2 가압상태에서 부하와 연결되어 있지 않은 경우

이 경우에 앞에서 구한 것들 중에서 전압 성분에 의한 진동과 차폐선에 전류에 의한 각 도체사이에 작용하는 힘에 의한 진동만을 생각하면 된다. 그림 3은 이경우의 진동의 상대 진폭을 나타낸다. 이 때 peak값은 0.8이다.

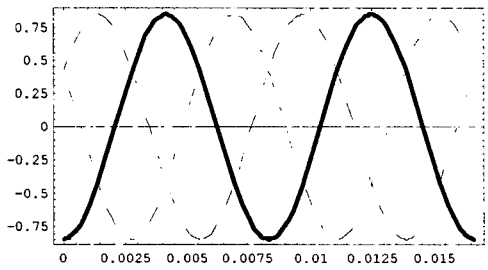

그림 3. Relative Amplitude of Cable Vibration for Live Cable Carrying No Current

2.3 사선인 경우

이 경우에도 차폐선을 통하여 전류가 흐르고 있기 때문에 방정식 (10)에서 전류를 1/6I 로 변환하여서 진동의 상대 진폭을 구하면 된다. 이 때 peak 값은 0.024였다.

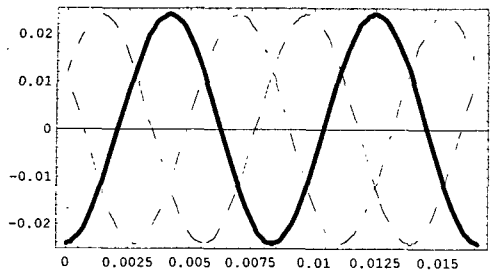

그림 4. Relative Amplitude of Cable Vibration for A Dead Feeder

3. 실험

케이블의 진동은 가속도 센서를 이용하여 감지할 수 있다. 케이블의 진동을 본 연구에서 개발된 PZT 세라믹 가속도 센서를 이용하여 측정하였다. 케이블의 진동 신호의 유·무를 측정하므로서 케이블의 가압 상태를 측정할 수 있다. 금속 덮게를 케이블에 고정시킨 후에 금속 덮게에 가속도 센서를 부착하였다. 측정되어질 신호가 금속 덮게에 전달이 되므로 3장에서 개발한 부착형 가속도 센서를 사용하여야 된다. 이 때 사용된 센서의 감도는 4.02 pC/ms^{-2} 이었다. 가속도 센서로부터 나온 신호를 증폭시키기 위하여 measuring amplifier를 사용하였다. 그림에서와 같이 케이블에서 나오는 특정한 신호를 얻기 위하여 함수 발생기로부터 기준 신호가 주어졌다. 기준 신호는 HP33120A 함수발생기를 이용하였다. Stanford Research사의 Lock-in amplifier를 기준 신호와 같은 증폭된 신호를 얻기 위하여 사용하였다. 이 경우에 기준 주파수를 갖는 신호외의 다른 신호는 모두 제거된다.

4. 실험 결과 및 고찰

실험은 한국전력공사 천안 변전소에서 시행하였다. 이 때 사용된 선로는 22.9kV 배전선로이고 전류는 200A였다. 케이블 차폐선은 다중 접지되어 있는 접지선으로 사용되었다. 이 때 차폐선에는 불평형 부하에 의한 전류가 흐르고 있었고 전류는 중심도체에 흐르는 전류의 1/6정도였다. 실험은 다음 세가지 경우에 대하여 시행하였다. 첫째는 가압되어있고 부하를 갖고 있는 경우, 둘째는 가압되어 있고 부하를 갖고 있지 않는 경우 그리고 마지막으로 세 번째는 가압되어 있지 않은 경우이다. 표 1은 simulation에서 구한 값과 실제 경우를 비교한 것이다.

표 1. 결과 비교

	컴퓨터 모의결과	현장 실험 결과
가압, 부하	1.5	39.14
가압, 무부하	0.8	17.65
사선(무가압, 무부하)	0.024	11.83

표에서 보여주듯이 세가지 다른 경우에 확실하게 구분할 수 있는 값을 보여 주고 있다. 그러므로 이 장치를 이용하면 세가지 경우를 쉽게 구분할 수 있을 것으로 생각된다. 다만 이때 사선의 경우에 컴퓨터 모의 결과에서는 매우 작은 값이 나타났으나 실제 현장 실험 결과는 상대적으로 큰 값이 나타났다. 이는 실제 현장에서 실제로 가압은 되어 있지 않지만 주변의 가압되어있는 케이블로부터 잡음 (noise)으로 해석할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 지중 전력 케이블의 가압 상태를 판별하기 위한 기초 연구를 행하였다. 케이블의 가압 여부는 다음 3가지로 구분하였다. 첫째는 가압되어 있는 상태에서 부하에 연결되어 있는 경우이고 둘째는 가압만 되어 있고 부하가 연결이 되어 있지 않은 경우이다. 이 경우에는 중심 도체에는 전류가 흐르지 않는다. 셋째는 가압 되어 있지 않고 사선인 경우이다. 이경우에는 전압도 없고 전류도 흐르지 않는다. 이 세가지의 경우에 대하여 모의 시험을 하여본 결과 세가지 경우를 구분할 수 있는 것으로 나타났다. 가속도 센서를 이용하여 실제로 한국전력공사 천안변전소에서 케이블의 가압 여부를 진단하기 위한 시험을 실시하였다. 실험 결과 센서로부터 출력된 값이 위의 세가지 경우를 충분히 구분할 수 있었다. 그러나 사선인 경우에 simulation된 값보다 훨씬 큰 값을 얻었다. 이는 차기 연구 대상이나 주변의 케이블로부터의 잡음 (noise)인 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] P. Graneau, "Underground Power Transmissi-on', John Wiley and Sons, 1979

[2] "Underground Systems Reference Book", Ch. 11, Edison Electric Institute, 1957.

[3] T. D. Walsh and T. M Feldman, "Shielded Cable is Tested to Determine if it is Energized", Transmission & Distribution, pp. 48-51, July 1991.