

CVT 철공진 억제필터에 관한 연구

이주훈*, 이진*, 윤용범**
 *LG산전, **한전 전력연구원

The study on ferroresonant suppression filters of CVT

Joo-Hun Lee*, Jin Lee*, Y.B. Youn**

*LG Industrial Systems co., Ltd. **Korea Elec. Power Reserch Ins.

Abstract - This paper looks into the characteristics of CVT's ferroresonant suppression filter using RTDS(Real Time Digital Simulator).

1. 서 론

실제 전력계통의 전압등급은 매우 높으므로 계전기의 입력으로 전압을 측정장치를 직접 연결하는 것은 불가능하다. 그리고 일반적으로 계전기의 입력 전압등급은 수백 볼트이하이므로 일반 계기용 변압기를 직접 사용하는 것은 비경제적이다. 따라서 탭을 이용하여 전압을 분배할 수 있도록 일련의 캐패시터와 계기용 변압기로 구성된 CVT(Capacitive Voltage Transformer)를 사용하여 계기용 변압기를 거치기 전에 계통 전압을 중간 수준의 전압으로 낮추어서 계기용 변압기의 입력으로 사용하는 것이 효과적이다. 또한 이렇게 함으로써 변압기 설계와 관련하여 발생하는 어려움 등이 줄어들게 된다. 전형적인 CVT는 하나이상의 캐패시터 스택(stack)과 계기용 변압기로 구성되며 CVT의 설계에 있어서 캐패시터 스택과 계기용 변압기 그리고 다른 컴넨트간에 상호작용은 과도조건하에서 다양한 진동 모드(mode)를 발생하게 된다. 특히 근단의 지락 사고 시와 같이 1차측 계통전압의 급작스런 감소에 의해서 발생하는 철공진과 같은 현상은 계전기의 입력으로 사용되는 전압과형에 매우 큰 오차를 발생하게 한다. 철공진이란 정현파 전원에 의해 캐패시터와 직렬로 연결된 포화특성을 가지는 인덕턴스 사이에서 발생하는 비선형성 진동현상으로 캐패시터와 계기용 변압기의 비선형 자화 인덕턴스 사이에서 발생하게 된다. 이와같은 철공진 현상의 발생을 억제하기 위해서 CVT 설계 시에 필터회로를 포함시킨다.

본 논문에서는 실시간 전력계통 해석용 시뮬레이터인 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 이용하여 CVT 철공진 필터의 특성을 모의하고 그 결과를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 철공진(Ferroresonance) 현상

철공진은 정현파 전원에 의해서 캐패시터(C)와 직렬로 연결된 비선형 또는 포화 가능성이 있는 인덕터(L)의 사이에서 나타나는 진동현상으로 공진되는 동안에 높은 전압과 전류가 발생될 수도 있어서 철공진을 포함하는 과전압의 경우에는 써지 어레스터(Surge Arrestor), 변압기 그리고 리클로저(Recloser) 등과 같은 전력기기의 동작실패 또는 손상을 일으키게 되고 과전류의 경우에는 섹셔널라이저(Sectionalizer) 또는 퓨즈(Fuse)의 동작실패 또는 손상을 일으키게 된다. 전력계통에서 철공진이 가장 잘 발생하는 경우는 단상 개폐기 상(Phase)과 상사이 또는 부하측의 상과 대지 캐패시터 사이에서 연결되어 있고 1차측 비접지 Y결선 또는 Δ결선된 경우하를 가지는 변압기가 있는 접지계통으로

차단기의 동작 또는 사고에 의해서 전압이 큰 폭으로 변화하는 경우에 차단기의 그레이딩(grading) 캐패시터와 CVT가 연결되어 있는 모선과 대지간 사이에 캐패시터를 통하여 CVT의 각 캐패시터로 지속적으로 전압이 공급되게 되는데 변압기의 비선형성 자화(Exciting) 리액턴스 사이에서 공진이 발생하게 되면 매우 왜곡되고 고조파(Harmonics)를 포함한 과전압이 지속적으로 발생하게 된다. 이때 CVT에 공급된 DC전압은 철심 포화의 원인이 된다. 철공진을 방지하기 위하여 일반적으로 다음과 같은 조치를 취하여준다.

- ① 3상 개폐
- ② 1차측 접지 Y결선 변압기 사용
- ③ Y결선 중성점 접지
- ④ 변압기 탭크와 차단기간의 거리를 제한

이러한 철공진 현상은 최근에 유입차단기와는 달리 근거리 차단 또는 모선고장 차단 등에서 TRV(Transient Recovery Voltage) 성능을 향상시키기 위해서 차단기 극간에 캐패시터를 사용하고 있는 가스차단기를 많이 사용하게 됨에 따라서 발생 가능성이 매우 높아지고 있다.

2.2 CVT의 구성

CVT는 일반적으로 다음의 요소들로 구성되며, 통신 캐리어(Communication Carrier)를 갖춘 CVT의 경우에는 드레인 코일(Drain Coil), 초크 코일(Choke Coi) 그리고 캐리어 스위치(Carrier Switch) 등이 추가적으로 구성에 포함되지만, 통신 캐리어 부분은 표현하지 않았다.

- ① 용량성 전압분배 스택 (Capacitive divider stack)
- ② 튜닝 리액터 (Tuning Reactor)
- ③ 강압 변압기 (Step-down Transformer)
- ④ 철공진 억제필터회로

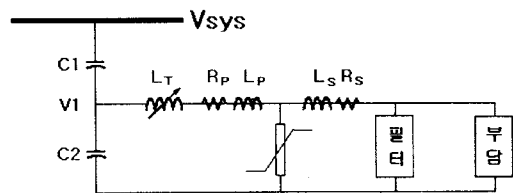


그림 1. CVT 등가회로

$$\text{여기서, } V_1 = V_{sys} \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

전압분배 스택은 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor)라고도 하며 전력계통의 고전압을 5(kV)정도의

중간전압으로 크기를 감소시키는 역할을 한다. 여기서, C_1 은 약 2000 [pF] 정도의 값을 가지는 것이 보통이다. 튜닝 리액터(L_T)는 보상 리액터라고도 하며 계통 주파수에서 전압분배 스택의 캐패시터의 리액턴스분에 의해서 발생하는 임피던스와 위상각의 변이를 보상하는 역할을 하는데 다음과 같이 나타낸다.

$$L_T = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (1)$$

여기서, $C = C_1 + C_2$, $\omega = 2\pi f$

그러나 이 값은 강압 변압기내의 리액턴스 성분을 고려하지 않은 것으로 강압 변압기내의 리액턴스 성분을 고려하여 나타내면 다음과 같다.

$$\omega[L_T + L_P + L_S(\frac{N_P}{N_S})^2] = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

여기서,

N_P, N_S : 강압 변압기의 1·2차측 권선수

L_P, L_S : 강압 변압기의 1·2차측 인덕턴스

강압 변압기는 전압분배 스택에서 중간전압으로 감소된 전압을 다시 115[kV](실효치 선간전압) 정도의 계통기 공칭전압(Nominal Voltage)으로 변압하는 역할을 하는데 강압 변압기의 철심은 비선형 포화특성을 가진다. 변압기 철심의 비선형 포화특성은 다음의 식과 같이 표현되며 α 는 포화특성 곡선 상에서 비포화 영역에서의 자속과 자화전류의 비를 나타내고 β 는 포화 영역에서의 자속과 자화전류의 비를 나타낸다.

$$i = \alpha\phi + \beta\phi^\gamma \quad (3)$$

여기서 α 는 정상상태 동작 시의 변압기 인덕턴스의 역수와 거의 일치하는 값을 가지며, γ 는 포화의 정도를 나타내며 소용량의 변압기의 경우에는 11 정도의 값을 가지지만 대용량의 변압기의 경우에는 11보다 큰 값을 사용하여야만 한다.

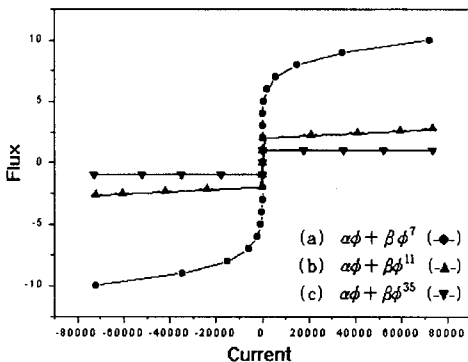
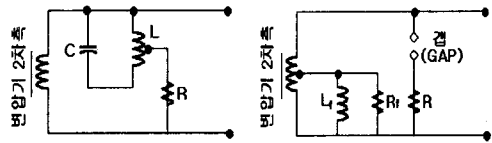


그림 2. 포화특성 곡선

철공진 억제필터는 그림 3에서 보는 바와 같이 수동형 철공진 억제필터와 능동형 철공진 억제필터로 나눌 수 있으며 일종의 대역통과 필터(Band-pass filter)로서 CVT의 출력에서 계통 주파수에 해당하는 신호를 추출하는 역할을 한다. 능동형 필터와 수동형 필터의 차이는 입력된 신호를 단순히 통과시킬 뿐인지 아니면 통과한 신호가 다시 입력되어 특성에 영향을 미치게 되는지의 차이이다. 부담은 일반적으로 저항과 인덕터의 조합의 형태로 부담의 크기와 위상각은 과도시의 감쇄하는 파형

의 크기 등에 영향을 미치게 된다. 과도현상은 CVT 내에 존재하는 에너지(Energy) 저장소자의 특성상 순간적으로 전압이 변하지 못하기 때문에 전력계통에서 발생하는 급격한 전압변화에 대하여 일정시간동안 과도기간을 가지게 되는 것으로 과도현상이 시작되는 위치에 따라서 달라지게 된다. $V_{in} \approx 0$ 인 경우에는 약 1.75 사이클(Cycle)동안, $V_{in} \approx V_{peak}$ 인 경우에는 약 1.25 사이클동안 과도현상이 지속되게 된다. 그러나 이런 과도현상에 의해서 철공진이 발생하게 되지만 일반적으로 철공진은 지속되는 시간이 길기 때문에 과도현상으로 보지 않는다.



(a) 능동형 필터 (b) 수동형 필터
그림 3. 철공진 억제필터

2.3 철공진 억제필터의 특성

철공진 억제필터는 CVT의 과도현상과 밀접한 관계를 가지고 있는데 이는 철공진 억제필터를 사용함으로써 추가적인 시지연 등을 발생시키기 때문이다.

2.3.1 능동형 필터의 동작

능동형 철공진 억제필터는 그림 3-(a)에서 보는 바와 같이 LC 병렬 튜닝(Tuning) 회로에 로딩(Loading) 저항이 연결된 형태이다. 여기서 튜닝 회로는 특정 주파수를 추출하는데 사용되고 로딩 저항은 인덕터의 중간에 연결되어 필터의 공진 임피던스를 크게 하여 신호의 감쇄량을 적게하는 역할을 하게 된다.

2.3.2 수동형 필터의 동작

수동형 철공진 억제필터는 그림 3-(b)에서 보는 바와 같이 로딩 저항 R_f , 공극 로딩 저항(Air-gap Loading Resistor) R 그리고 인덕터 L_f 로 구성되어 있다. 이 필터는 정상상태 동작 시에는 강압 변압기의 2차측 전압이 공극사이에서 방전(Flashover)현상이 발생할 만큼 크지 않아서 CVT의 성능에 영향을 주지 않지만, 철공진이 발생하게 되면 공극사이에 방전일 발생하여 공극 로딩 저항 R 이 회로에 연결되면서 철공진 현상을 억제하는 역할을 하게 된다. 여기서, 인덕터 L_f 는 공칭전압(Nominal Voltage)의 150%정도에서 포화되도록 설계한다.

2.3.3 철공진 필터의 설계

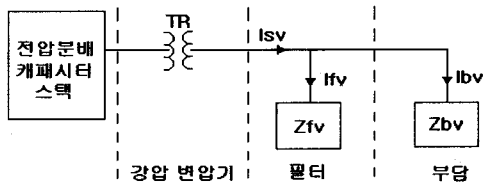


그림 4. CVT의 등가회로

여기서,

$$v = n f_n, \quad n : \text{고조파의 차수}, \quad f_n : \text{계통 주파수}$$

그림 1의 등가회로를 간략하게 나타내면 다음의 그림 4와 같이 나타낼 수 있는데, 결국은 강압 변압기의 2차

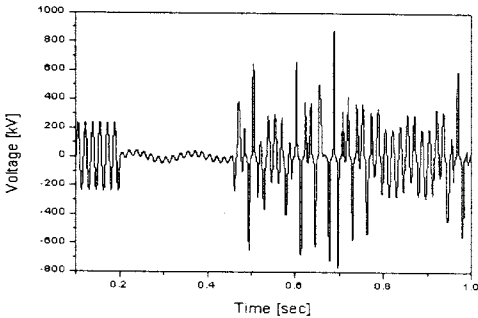
측에서 n차 고조파 전류 I_{sn} 가 흐르는 때에 부담측에 흐르는 전류 I_{sv} 의 비(I_{sv}/I_{bc})가 가장 중요하다고 볼 수 있다.

철공진 억제필터가 없는 경우에는 $I_{sv} = I_{bc}$ 이 되지만, 철공진 억제필터가 사용되는 경우에는 다음의 식(4)와 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

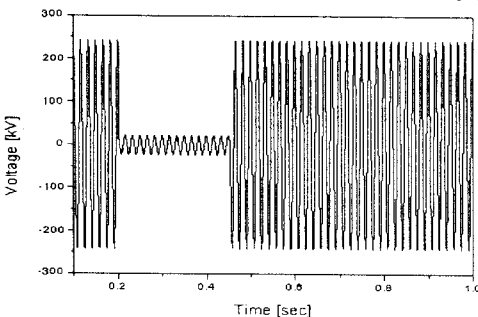
$$\frac{I_{bc}}{I_{sv}} = \frac{|Z_{fc}|}{|Z_{fc} + Z_{bc}|} \quad (4)$$

$$\frac{I_{fv}}{I_{sv}} = \frac{|Z_{bc}|}{|Z_{fc} + Z_{bc}|} \quad (5)$$

위의 식(4)와 (5)에서 철공진이 발생하는 경우에는 $|Z_{fc}| \ll |Z_{bc}|$ 가 되고 고조파가 효과적으로 제거된 경우에는 $|Z_{fc}| \gg |Z_{bc}|$ 가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 4.에서 부담측의 각 고조파에 대한 임피던스를 구하여 가장 큰 임피던스를 발생하게 하는 고조파가 가장 영향을 크게 미치는 지배적(Dominant)인 고조파라고 할 수 있고, 이 고조파를 제거하도록 필터의 차단 주파수(Cut-off Frequency)를 설정하여주면 된다. 또한 철공진 필터의 설계 시에는 필터의 무효전력(Reactive Power)이 가능한 최소가 되도록 하여 필터로 인한 손실이 가능한 최소가 되도록 하여야 한다.



(a) 철공진 억제필터를 사용하지 않은 경우



(b) 철공진 억제필터를 사용한 경우
그림 5. 철공진 억제필터 모의 결과

위의 그림 5의 결과를 살펴보면 그림 5-(a)의 경우에는 철공진 억제필터를 사용하지 않은 경우로 급격하게 전압이 변동할 때 철공진이 발생하여 불규칙하게 지속적으로 과전압이 발생하는 것을 볼 수 있지

만, 철공진 억제필터를 사용하는 경우에는 그림 5-(b)에서 보는 바와 같이 철공진이 효과적으로 억제된 결과를 볼 수 있다.

2.3.4 거리 계전기 성능에 미치는 영향

CVT의 과도현상은 사고전압의 계통 주파수 성분을 또한 감소시키게 된다. 이러한 감소현상은 거리 계전기의 임피던스 연산에 오차를 발생하게 하여 계전기가 보는 임피던스를 감소하게 하여 Zone 1의 외부사고에 대하여 오동작하는 오버리치(Overreach) 현상을 발생하게 한다. 정격부담의 100[%]가 연결된 경우에 이상적으로 변압비만 고려하는 경우와 비교해보면 정상상태에서도 약 2.8[%]의 오차를 가지고 있다.

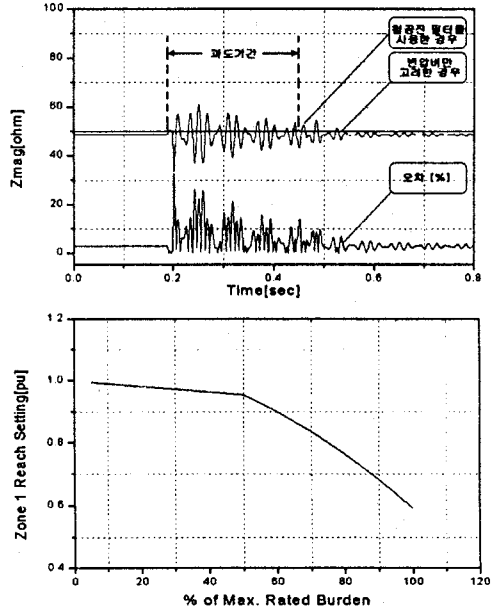


그림 6. 정격부담에 따른 Reach ($Z_b = 100(\text{ohm})$)

3. 결 론

본 논문에서는 RTDS를 이용하여 CVT의 철공진 억제필터의 특성과 철공진 필터가 계전기가 보는 임피던스에 미치는 영향 등을 보였다. 위의 결과에 의하여 적절한 계통보호를 위하여서는 최대 오차만을 고려하여 계전기를 정정하는 것보다는 CVT의 필터나 부담의 변화에 따른 영향을 고려하여 Zone 경계지점에서의 오동작을 방지하도록 정정하는 것이 바람직하다고 하겠다.

[참고 문헌]

- [1] Dr. Edmund, O. Schweicher, "A Review of Impedance-based Fault Location Experience", Oct. 16, 1990
- [2] Daqing Hou, Jeff Robert, "Capacitive Voltage Transformers: Transient Overreach Concerns and Solutions for Distance Relaying", May. 1, 1996
- [3] S.K. Chakravarthy, C.V. nayar, "Ferroresonant Oscillations in Capacitive Voltage Transformers", IEE Proc.-Circuits Devices Syst., Vol.142, No. 1, pp.30~36, 1995
- [4] S. Mozaffari, S. Henshel, A.C. Soudack, "Choatic Ferroresonance in Power Transformers", IEE Proc.-Circuits Devices Syst., Vol.142, No. 3, pp. 247~250, 1995
- [5] 우정욱, 심용보, 김승규, "154kV GIS의 PT 철공진 소손 사례와 원인규명", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2076~2079, 1999