

FXLMS 알고리즘을 이용한 전력용 변압기의 능동소음제어에 관한 연구

박우용, 김신대, 김영달
한밭대학교

A study on the Active Noise Control for Power Transformer using FXLMS Algorithm

Woo-Yong Park, Seun-Dae Kim, Young-Dal Kim
Hanbat National University

Abstract - 변압기에서 발생하는 소음은 근무자의 작업 환경을 열악케 하는 직접적인 요인이 될 뿐만 아니라 정신적인 스트레스를 받게 되어 작업능률 저하 및 변전소 인접 주민들의 일상생활 환경을 저해하는 요인이 되고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 FXLMS 알고리즘을 적용한 변압기의 능동소음제어에 대한 연구를 수행하였으며, 다중음 다채널 제어가 가능한 시스템을 개발하여 현장에 적용한 결과, 120Hz에서는 9.06[dB]의 능동소음감쇄가 이루어졌으며, 전체적으로 4.55[dB]의 감쇄효과가 얻을 수 있었다.

Key Words : Active Noise Control, Filtered-X LMS, Multi Tone, Multi Channel

1. 서 론

주위에 원하지 않는 소음은 많은 산업용 기기와 자동차 등에 의해 만들어져 인간에게 공해를 주고 있으므로 이러한 환경을 탈피하고자 하는 것이 심리적인 현상으로 최근 들어 사회적 문제로 크게 대두되어 주로 방음벽을 설치하곤 하였다. 그러나 고주파 소음일 경우는 가능하였으나 저주파 소음일 경우 이를 차단하는데 있어 많은 경제적 부담을 안고 있기 때문에 능동 소음제어(active noise control; ANC)라는 새로운 방식이 제안되어 이를 실용화시키기 위해 세계적으로 많은 노력들을 하고 있다[1-3]. 이에 대하여 Ross[4]는 변전실내의 변압기 소음을 제어하는 연구와, Morgan[5]은 3차원 공간에서 소음을 능동 제어하는 연구하였다. 현재로는 공간 전체에서의 소음제거를 하지는 못하나 국부적으로 침묵 영역을 형성하는 단계에 이르고 있으며[6], 이 경우 복잡한 음향 시스템을 배제하고 단일 시스템으로 능동 소음 제어를 실현하는 연구에 많은 노력을 기울이고 있다 [7-9].

과거에 연구되었던 시스템은 대부분이 단일음 단일채널을 이용하였으나 대형 변압기의 소음원을 저감시키는 데에는 한계가 있어, 본 연구에서는 다중음, 다중채널을 이용한 ANC 시스템을 개발하여 현장 변압기에 적용을 하여 그 결과를 통해 대형 변압기의 소음을 저감하는데 기여하고자 한다[10-13].

2. 본 론

2.1 Filtered-X LMS 알고리즘

대형 변압기 소음을 능동적으로 제어하기 위해 크게 피드백 제어 알고리즘과 전향 제어 알고리즘 제어기법 등이 사용되며, 이들 두 가지 장점을 살려 안정성과 제어성능을 향상시키는 hybrid 제어 알고리즘을 적용하기도 한다. 대형 변압기 소음은 60Hz의 주파수 신호에 의해 자속이 120회 교번되며, 코아와 코일에 의해 노이즈가 야기된다. 그리고 소음의 전달경로가 온도, 습도, 장애물들의 여러 가지 요소들로 시변하는 시스템이기 때문에 정확한 모델링이 어렵다는 단점이 있다. 그러나 변압기의 진동이나 진류로부터 기준신호를 측정하기가 용이하며, 이러한 기준신호를 측정할 수 있는 복잡한 구조물의

제어가 가능하다. 또한 효과적인 전향제어 방법을 이용하여 제어하는 것이 바람직하다.

LMS 알고리즘에서는 제어출력이 직접 오차 신호를 측정하는 센서에 잡히는 구조를 가지고 있다. 즉, 센서와 가진기가 같은 위치에 있어야 한다. 그러나 대부분의 경우에 있어서는 부가가진기와 센서는 그 위치가 다르므로 LMS 알고리즘을 바로 적용할 수 없게 된다.

본 연구에서는 대형 변압기의 소음을 소음 및 진동에 많이 사용되고 있는 LMS방법을 근거로 한 Filterd-X LMS 알고리즘을 이용하여 제어하도록 한다. 제어출력으로부터 센서까지의 시스템이 존재할 때, 이를 고려하여 수정된 Filterd-X LMS 알고리즘을 적용하였으며, 블록선도는 그림 1과 같이 나타내었다.

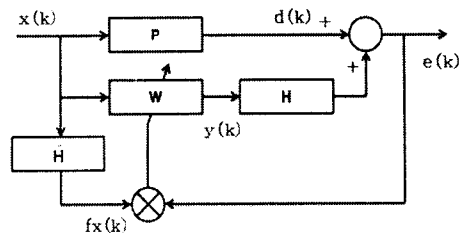


그림 1. FXLMS 알고리즘의 블록도

\hat{H} 는 오차계의 모델이며 길이가 $L_n + 1$ 인 FIR필터로 가정한다. FXLMS 알고리즘은 LMS 방법에서와 동일하게 순간에러 제곱인 $e^2(k)$ 최소화하기 위해 최급하강법을 이용한다. 제어기 W 의 입력은 $x(k)$ 신호이고, 출력은 $y(k)$ 이다. 오차계 모델과 오차계가 같다고 가정할 때 오차 신호는

$$e(k) = d(k) + \sum_{j=0}^{L_n} h_j y(k-j) \tag{2.1}$$

$$= d(k) + \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^{L_n} h_i w_i(k-j) x(k-i-j)$$

가 된다. 한편 적용 필터의 계수는

$$w_i(k+1) = w_i(k) - \mu \nabla_i(k) \tag{2.2}$$

와 같이 갱신되며, 순간 기울기는 $w_i(k) \approx w_i(k-1) \approx \dots \approx w_i(k-L_n)$ 를 만족한다고 가정할 때 즉, 적용필터의 계수가 천천히 변한다고 가정할 때, 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla_i(k) = \frac{\partial e^2(k)}{\partial w_i(k)} = -2e(k) \sum_{j=0}^{L_n} h_j x(k-i-j) \tag{2.3}$$

그러므로 필터계수 갱신식은

$$w_i(k+1) = w_i(k) - 2\mu e(k) \sum_{j=0}^{L_k} h_j x(k-i-j) \quad (2.4)$$

$$\equiv w_i(k) - 2\mu e(k) f x(k-i)$$

가 된다.

여기서 $f x(k)$ 는 기준신호가 오차계 모델을 통과한 신호이다.

2.2 ANC 시스템 구성 및 변압기 소음분석

다중음/다채널 능동제어시스템의 하드웨어구성은 그림 2와 같은 전체블록도로 구성하였으며, ANC시스템은 그림 3과 같이 제작하였다. 먼저 실험실에서 변압기소음원과 같은 소음을 발생시키고 ANC를 적용하여 제어 출력과 에러마이크로폰의 위치에 따른 소음감쇄현상을 관찰하였다. 또한 현장실험을 위해 그림 4와 같이 20채널까지 적용할 수 있는 시스템을 제작하였으며, 현재 운전 중인 154[kV] 60[MVA] 3상 변압기에 15채널까지 적용하여 실험하였다.

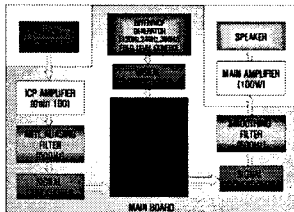


그림 2. ANC 시스템 블록도

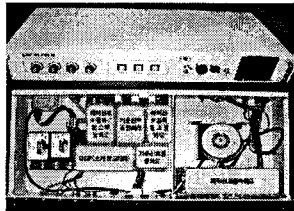


그림 3. ANC시스템 시작품

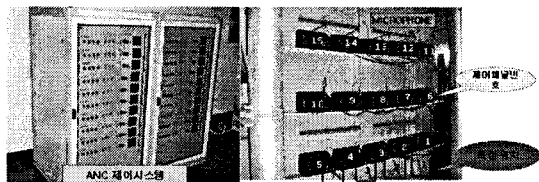


그림 4. 다채널 ANC시스템 및 제어출력 위치

또한 대형 변압기의 소음을 측정분석하기 위해 그림4의 우측에 배치한 에러 마이크로폰 위치에서의 측정하였으며, 각 주파수에 대한 소음 맵을 그림 5와 같이 나타내었다.

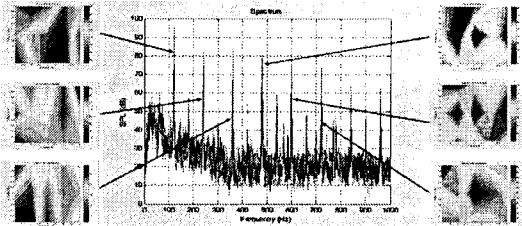


그림 5. 변압기 소음 맵과 주파수와의 관계

측정 결과, 각 주파수 120Hz는 95.55[dB], 240Hz는

82.59[dB], 360Hz는 84.07[dB], 480Hz는 80.62[dB], 600Hz는 75.05[dB], 720Hz는 72.56[dB]로 각각 최대치를 나타내었다.

2.3 측정결과 분석

2.3.1 모의실험 측정 및 분석

모의 실험하는데 조건은 소음과 제어출력과 에러마이크로폰의 위치에 따라 세 가지로 구별하였으며, 제어주파수 120Hz, 240Hz, 360Hz의 단일 음과 그 주파수들을 조합한 다중 음에 대한 데이터를 측정하였다. 먼저 모의실험조건은 그림 6과 같이 소음과 제어출력과 에러마이크로폰의 위치를 일직선이 되게 하였으며, 각 제어주파수에 따라 오실로스코프로 측정하였다. 그 결과 단일 음(120Hz, 240Hz, 360Hz)의 경우 그림 7과 및 표 1과 같이 측정되었으며, 240Hz에서 22.3[dB] 정도로 가장 많이 감소하였다. 또한 다중음인 경우, 그림8과 그림10과 같이 감소되는 것을 알 수 있었고, 표 1에서 120Hz+240Hz의 경우 23.4[dB]로 가장 크게 감소됨을 알 수 있었다.

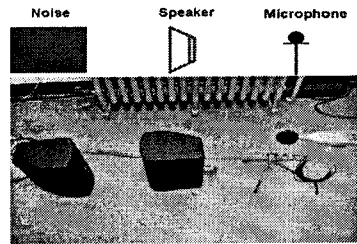


그림6. 모의실험 조건

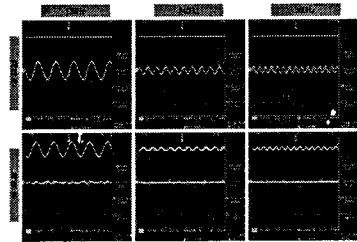


그림 7. 단일음 측정파형

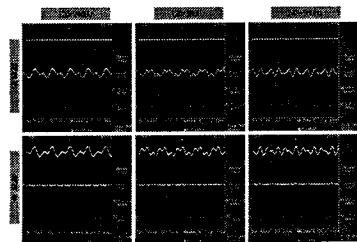


그림8. 이중음 측정파형

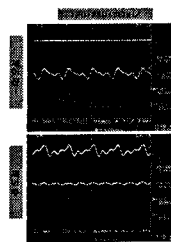


그림 9. 삼중음 측정파형

표 1. 모의실험 조건에서의 측정결과

제어조건	제어전[dB]	제어후[dB]	감소량[dB]
120Hz	80.80	69.70	11.10
240Hz	80.80	58.50	22.30
360Hz	80.80	62.80	18.00
120Hz+240Hz	85.60	62.20	23.40
120Hz+360Hz	83.10	65.10	18.00
240Hz+360Hz	86.60	66.20	20.40
120Hz+240Hz+360Hz	87.10	73.00	14.10

2.3.2 현장실험 측정 및 분석

현장 실험하는데 조건은 표 2와 같이 수행하였으며, 그림 4의 우측과 같이 15개소에서 제어를 하였으며, 소음측정 위치는 그림 4의 우측 하단과 같이 4개소에서 실시하였다.

또한 제어주파수 120Hz, 240Hz, 360Hz의 단일 음과 그 주파수들을 조합한 다중 음에 대한 데이터를 측정하였다. 그 결과 120Hz에서는 그림 10과 표 3에서 보는 바와 같이 측정위치-1에서 약 13.1[dB]로 크게 감소하였다.

표 2. 현장 실험조건 1

제어 항목	제어 조건
서터문 상태	닫힘
제어주파수	120Hz
Main AMP Gain	50%
기준신호 각 주파수 레벨	120Hz = 80%
기준신호 전체레벨	80%

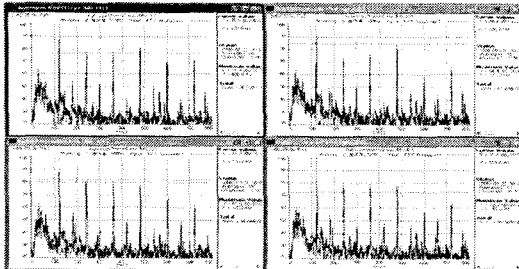


그림 10. 120Hz 단일음 측정 파형

표 3. 현장실험 조건1에서의 측정결과

120Hz	측정위치-1	측정위치-2	측정위치-3	측정위치-4
제어전	90	93.8	90.3	81.7
제어후	76.9	84.4	81.9	72.4
감소량	13.1	9.4	8.4	9.3

240Hz에서는 표 4와 같은 조건으로 그림 11과 표 5와 같이 측정위치-1에서 약 16.3[dB] 감소되었으며, 또한 360Hz에서는 표 6의 조건으로 그림 12와 표 7과 같이 측정위치-3에서 약 14.0[dB] 감소됨을 알 수 있었다.

표 4. 현장 실험조건 2

제어 항목	제어 조건
서터문 상태	닫힘
제어주파수	240Hz
Main AMP Gain	50%
기준신호 각 주파수 레벨	240Hz = 80%
기준신호 전체레벨	80%

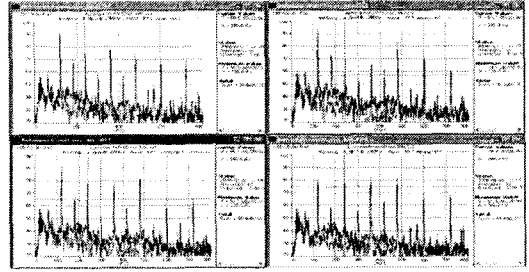


그림 11. 240Hz 단일음 측정 파형

표 5. 현장실험 조건2에서의 측정결과

240Hz	측정위치-1	측정위치-2	측정위치-3	측정위치-4
제어전	76.8	72.2	80.1	82
제어후	60.5	57.1	65.1	74.9
감소량	16.3	15.1	15	7.1

표 6. 현장 실험조건 3

제어 항목	제어 조건
서터문 상태	닫힘
제어주파수	360Hz
Main AMP Gain	50%
기준신호 각 주파수 레벨	360Hz = 50%
기준신호 전체레벨	80%

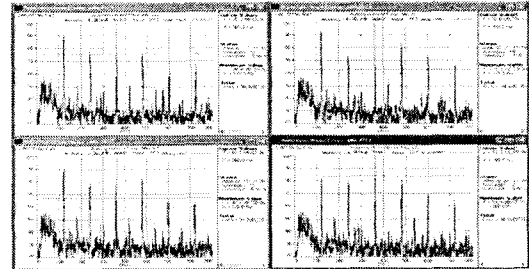


그림 12. 360Hz 단일음 측정 파형

표 7. 현장실험 조건3에서의 측정결과

360Hz	측정위치-1	측정위치-2	측정위치-3	측정위치-4
제어전	76.4	70.5	81.1	80.6
제어후	75.3	62.6	67.1	83.9
감소량	1.1	7.9	14	-3.3

최적의 능동소음제어가 이루어지는 경우를 찾기 위해 여러 가지 조건에서 실험을 수행하였다. 단일주파수로만 제어하는 경우와 두 개 이상의 주파수를 합성하는 방법과 개별주파수로 제어하는 방법 그리고 소음 펄스와 유사한 기준신호의 주파수와 크기로 제어하는 방법들을 수행하였다. 그 결과 각 측정위치에서 각 주파수별로 평균을 구하였는데 표 8과 같은 결과를 얻었으며, 전체적으로 9.45[dB]가 감소하였다.

표 8. 현장 조건에서의 각 주파수별 측정 평균

주파수	위치-1	위치-2	위치-3	위치-4	조건평균
120Hz	13.1	9.4	8.4	9.3	10.05
240Hz	16.3	15.1	15	7.1	13.38
360Hz	1.1	7.9	14	-3.3	4.92
전체 평균	10.17	10.80	12.47	4.37	9.45

3. 결 론

본 연구에서는 다중음/다채널의 FXLMS 알고리즘을 적용한 능동소음제어시스템을 이용한 운전 중 변압기 소음저감에 관한 현장실험을 수행하였다. 그 결과 모의 실험과 현장 실험 결과를 비교해 보면 많은 차이를 보였다. 그 이유는 현장 실험에 반사음을 고려한 제어를 하지 못하였기 때문으로 판단되며, 소음 피크 주파수에 대하여 120Hz, 240Hz, 360Hz만을 고려하였으나 실제 소음원과 비교해 보면 480Hz에서는 80[dB] 이상의 소음이 발생하였으며, 600Hz, 720Hz에서도 70[dB] 이상으로 무시할 수 가 없는 피크주파수가 발생됨을 알 수 있었다. 그러므로 향후 다중음에 대한 제어주파수를 720Hz 까지로 확대할 필요가 있으면 반사음에 대한 대책이 절실히 요구되었다.

이와 같이 현재 운전 중인 변압기에 적용할 경우, 변전소 인근 주민으로부터 발생하는 민원을 해소할 수 있을 뿐만 아니라, 변전소나 발전소에서 근무하는 작업자들의 직업병을 해소하며, 작업능률 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

이 논문은 산업자원부 전력산업기반기금센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. B. Chaplin, "Method and apparatus for canceling vibration." U. S. Patent No. 4 489 441 Dec. 18, 1984.
- [2] L. J. Eriksson, M. C. Allie, and C. D. Bremigan, "Active noise control using adaptive digital signal processing," in Proc. ICASSP(New York), pp. 2594-2597, 1988.
- [3] G. E. Warnaka, L. Poole, and J. Tichy, "Active attenuator." US Patent 4 473. 906, Sept. 25, 1984.
- [4] C. F. Ross, "An algorithm for designing a broadband active sound control system", J. Sound and vibration, Vol.80, No.3, pp.373-380, 1982.
- [5] D. R. Morgan, and J. C. Thi, "A delayless subband adaptive filter architecture", IEEE Trans. on Signal Proc., Vol.43, No.8, pp.1819-1830, 1995.
- [6] M. O. Tokhi, and R. R. Leitch, "Active Noise Control", Clarendon Press Oxford, 1992.
- [7] A. J. Efron, and L. C. Han, "Wide-area adaptive active noise cancellation", IEEE Trans. on Circuits and System-II: Analog and Digital Proc., Vol.41, No.6, pp.405-409, 1994.
- [8] D. Graupe, A. J. Efron, "A Output-Whitening Approach to Adaptive Active Noise Cancellation", IEEE Trans. on Circuit and Systems, Vol.38, No.11, pp.1306-1313, 1991.
- [9] A. V. Oppenheim, K. C. Zangi, and D. Gaupe, "Single-Sensor Active Noise Cancellation", IEEE transactions on speech and processing, Vol.2, No.2, pp.285-290, 1994.
- [10] 김영달, 정창경, 심재명, "변압기 소음제어를 위한 음향시스템의 동특성 해석 및 전달함수 추정", 한국조명-전기설비학회지, 제13권, 제3호, 1998.
- [11] 김영달, 이민명, 정창경, "적용 모델을 이용한 단일채널 능동소음제어", 대한전기학회, 제49-D권, 제3호, pp442~450, 2000.
- [12] 김영달, "주변압기의 소음저감 및 소음기 개발에 관한 연구", 한국조명-전기설비학회논문지, 제20권, 제1호, pp111~118, 2006.
- [13] 박우용, 김성중, 이부원, 이종화, 김봉기, 이육륜, 이준신, 안경덕, 김영달, "멀티톤/멀티채널의 FXLMS 알고리즘을 이용한 변압기 소음제어에 관한 연구", 대한전기협회 하계학술대회 논문지, p379~380, 2007.