

다구치 방법론을 이용한 태양광 인버터의 LCL 필터 설계

김병헌, 지승준, 설승기
서울대학교 전기·정보공학부 전력전자센터

Design for LCL filter on PV Inverter based on Taguchi method

Kim, Byeong-Heon, Seung-Jun Chee, and Seung-Ki Sul
Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 태양광 인버터에서 전력 품질 개선을 위해서 사용되는 LCL 필터의 설계 방법을 제시한다. 제안된 방법은 생산 품질의 질을 향상시키기 위해 산업체에서 사용되고 있는 다구치 방법론을 이용한다. 기존 설계에서 고려되던 출력 전력 품질(THD), 인덕터의 크기뿐만 아니라 태양광 인버터의 손실, 광량 변화로 인한 입력 조건의 변화, 출력 전압의 변화를 고려하여 설계한다. 설계 결과는 설계 목표 기능 변수를 향상시키고 동시에 그 변동량을 최소화할 수 있다.

1. 서 론

수~수 백 kW급 태양광 인버터에서는 PWM 전압형 인버터를 사용하여 3상 계통에 전력을 공급하며, 출력 전류의 고조파 규정을 만족하기 위해서 고조파 필터가 추가된다. 특히 LCL 필터는 L필터에 비해 성능 대비 크기 등에 큰 장점을 보여 고조파 필터로 많이 사용된다.^[1]

다수의 기존 LCL 필터 설계는 고조파 및 인덕턴스의 크기 저감을 목표로 한다. 이러한 설계에서는 운전 효율을 중요한 고려 요소로 보지 않으며, 설치 시 변동할 수 있는 외부 조건 역시 고려하지 않는 경우가 많았다.

인덕터의 크기는 인버터의 운전 효율에도 영향을 미치게 되며, 전고조파왜율(THD)과 달리 인덕턴스가 커질수록 떨어지는 경향을 보이게 된다. 계통 연계 시 출력 측 전압 크기와 주파수가 변동할 수 있는데, 이로 인해 LCL 필터의 성능에 변동을 주게 된다. 또한 태양광 인버터는, 광량 변화로 인해 부하 조건이 달라지는데, 이로 인해 운전 효율이 영향을 받을 수 있다.

본 논문에서는 다양한 사용 조건에서도 기능을 최상의 상태로 유지하게 만드는 다구치 방법론을^[2] 적용하여 LCL 필터를 설계한다. THD 및 인덕턴스 크기에 인버터의 운전 효율 역시 기능 변수에 고려하여 이를 향상시키고, 외부 조건인 계통의 상태 및 광량 변화 등에도 기능 변동량을 최소화하는 것을 목표로 한다.

2. 본 론

총 2차에 걸쳐 실험을 수행한다. 각 실험은 건실 최적 설계의 PDCA(Planning-Design-Conducting-Analysis) 사이클에 따라 수행된다.^[2] 설치 목표는 250kW급 태양광 인버터로, 2레벨 인버터에 비해 손실이 작은 3레벨 인버터를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 7.5 kHz로 설정하였다.

2.1. 제 1차 실험

2.1.1 계획 (Planning)

가장 기본적인 기능인 고조파 저감을 위해 THD를 기능 변수에 포함하고, 동시에 고조파 규제에 관한 국제 표준인 IEEE 519-1992를 만족하는지 확인한다. 운전 효율은, 부하 대비 손실 비율을 계산하여 기능 변수에 포함하였다. 인덕터의 크기와 양의 상관 관계를 갖는 에너지 저장량도 기능 변수에 포함하였다. 이러한 요소들이 동일한 비중을 차지하도록 가중치를 설정하여 설계 목표 기능 변수를 식 (1)과 같이 설정하고 이를 최소화하는 설계를 수행한다.

$$W = w_1 THD + w_2 \eta_{euro} + w_3 E_{L1} + w_4 E_{L2} \quad (1)$$

여기서, THD 는 정격 전류 시 %THD, η_{euro} 는 유로 손실, E_{L1} 과 E_{L2} 는 정격 전류에서 각 인덕터에 저장되는 에너지량을 의미한다. $w_i (i=1,2,3,4)$ 는 각 물리량의 가중치다.

설계 변수는 인버터 측 인덕터(L1), 계통 측 인덕터(L2), 필터의 공진 주파수로 잡을 수 있다. 캐패시턴스 값을 설계 변수로 택하면 설계 변수끼리 상관관계가 발생할 수 있어, 공진 주파수를 설계 변수로 대체했다. 각 수준은 인덕터는 전체 합이 0.2 p.u. 내에 있도록, 공진 주파수는 스위칭 주파수에서 1/1000의 감쇄율을 갖게 하는 3.8 kHz 근처가 되도록 설정하였다.

표 1 제 1차 설계 변수
Table 1 Control factor of the first cycle

설계 변수	수준 1	수준 2	수준 3
X1 (L1)	0.01 p.u.	0.05 p.u.	0.10 p.u.
X2 (L2)	0.01 p.u.	0.05 p.u.	0.10 p.u.
X3 (공진 주파수)	3.5 kHz	4 kHz	4.5 kHz

고객 제품 사용 조건은 설계자의 의지와 무관하게 변하지만, 기능 변수에 영향을 미치는 요인으로 일종의 최적 설계에서의 제한 조건이다. 먼저 인버터의 입력 측의 다양한 일사량을 고려할 수 있는데, 이 경우 실험 횟수가 기하급수적으로 증가하게 된다. 본 설계에서는 유로 효율을 참고하여 의미 있는 일사량과 그 가중치를 추출하고, 이를 통해 유로 손실을 정의하며, 이를 기능 변수에 포함하여 일사량 변화를 반영할 수 있도록 하였다. 인버터 출력 측에서는 계통의 상태 변화를 고려할 수 있으며, 특히 전압 크기와 주파수 변동이 고려된다. 표 2에서는

이러한 변동을 고려한 고객 제품 사용 조건을 정리하였다.

표 2 제 1차 고객 제품 사용 조건

Table 2 Noise factors of the first cycle

N1	N2	N3	N4
0.9 Vp.u.	0.9 Vp.u.	1.1 Vp.u.	1.1 Vp.u.
59.3 Hz	60.5 Hz	59.3 Hz	60.5 Hz

재현 설비는 실제 인덕터를 여러 개 제작하는 데 한계가 있으므로, PLECS 시뮬레이션으로 회로를 구성하여 구현하였다.

2.1.2 전개 및 수행 (Design and Conducting)

모든 수준의 경우의 수를 고려하여 실험을 수행하지 않고, 다구치 방법론의 수직 행렬($L_9(3^4)$)을 통해 횡수를 줄인다.

수행한 결과는 그림 1과 같다. S/N 비(dB)는 식 (2)와 같이 고객 제품 사용 조건에 따른 기능 변수의 변동량을 정의한 것으로 기능 변수 값 자체의 성능 역시 반영한다.

$$S/N\text{비} = -10 \times \log\left(\frac{W_{1+}^2 + W_{2+}^2 + W_{3+}^2 + W_{4+}^2}{4}\right) \quad (2)$$

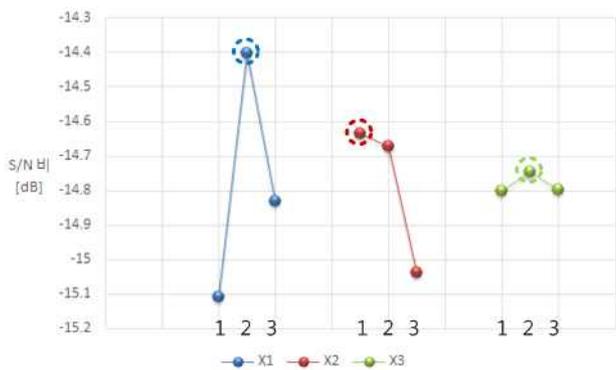


그림 1 제 1차 실험 결과 (수준별 평균 S/N 비)
Fig. 1 S/N response graphs of the first cycle

2.1.3 분석 (Analysis)

그림 1의 실험 결과에 따르면, 설계 변수는 각각 수준 2, 수준 1, 수준 2에서 최대 성능을 낼 것으로 기대된다. 이 때 S/N 비는 -14.19 dB로, 1차 실험의 최대 S/N 비와 같다.

고객 제품 사용 조건에 따른 기능 변수의 변동은 크기 변동이 주로 영향을 미친다. 주파수에 의한 영향은 전압 크기에 의한 영향의 1%도 되지 않고, 기능 변수 대비 변동량 역시 0.1%가 되지 않아 2차 실험에서는 무시한다.

2.2 제 2차 실험

2.2.1 계획 (Planning)

1차 실험 결과, 공진 주파수는 상대적으로 S/N비에 크게 영향을 주지 않으므로, 2차 실험에서는 수준 2로 고정하며, 인덕터만 설계 변수로 고려한다. 새로운 수준은 1차 실험 결과를 기준으로 표 3과 같이 결정할 수 있다.

표 3 제 2차 설계 변수

Table 3 Control factor of the second cycle

설계 변수	수준 1	수준 2	수준 3
X1 (L1)	0.04 p.u.	0.05 p.u.	0.06 p.u.
X2 (L2)	0.005 p.u.	0.010 p.u.	0.015 p.u.

고객 제품 사용 조건 역시 계통 주파수는 60Hz로 고정하고,

크기 0.9 Vp.u.에서 1.1 Vp.u.로의 변화만 고려한다.

2.1.2 전개 및 수행 (Design and Conducting)

1차 실험과 마찬가지로 $L_9(3^4)$ 행렬을 사용하며, S/N 비는 고객 제품 사용 조건이 2개로 줄었으므로 식 (2)에서 이를 반영하여 수정하여 계산한다. 그림 2는 1, 2차 실험 결과를 모두 정리한 것으로, 2차 실험에서의 S/N비는 모든 값이 1차 실험에서의 값보다 큰 것을 알 수 있다.

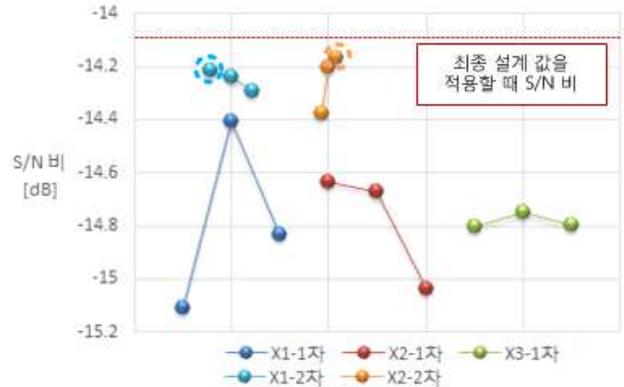


그림 2 최종 실험 결과 (수준별 평균 S/N 비)
Fig. 2 S/N response Graphs

2.1.1 분석 (Analysis)

2차 실험 결과에 따라, 설계 변수를 수준 1, 수준 3으로 설정하면 S/N 비는 -14.12 dB로, 그 어떤 1, 2차 실험의 결과에 비해서도 큰 값을 가졌다. 1차 실험의 최소값(-15.39 dB)에 비해 해당 평균 고객 부담 사용료를 75.1%로 낮추게 되어 기능 역시 향상 된다. 각 차수별 고조파는 규정을 만족하였다. 최종 설계 변수는 표 4에 정리하였다.

표 4 최종 설계 변수

Table 4 The final control factor

설계 변수	X1 (L1)	X2 (L2)	X3 (공진 주파수)
설계 값	0.04 p.u.	0.015 p.u.	4 kHz

3. 결론

본 논문에서는 태양광 인버터에서의 LCL 필터 최적 설계를 수행하였다. 다구치 방법론을 적용하여, THD, 인버터 손실, 인버터의 부피에 가중치를 둔 기능 변수를 최소화하며 동시에 일사량 및 계통 상태 변화를 고객 제품 사용 조건으로 고려하는 건설 최적 설계를 수행하였다. 본 설계를 통해 기능 변수를 향상시킬 뿐 아니라, 그 변동량 역시 최소화하는 설계 값을 얻을 수 있었으며, 특히 THD는 IEEE 519-1992를 만족하여 기본적인 필터 성능 역시 만족시켰다.

참고 문헌

- [1] S. H. Jung, and Se-Wan Choi, "Optimized LCL filter Design Method of Utility Interactive Inverter," *The Transactions of Korean Institute Power Electronics*, Vol. 18, No 1, pp 103-109, Feb. 2013.
- [2] 김종원, 공학설계: 창의적 신제품 개발방법론, 문운당, pp. 187-377, 2009.