

스마트그리드에서의 다중 스위칭 방식의 자동 전압 조절 방법에 관한 연구

박광윤[○], 김정률^{*}, 김병기^{*}

[○]숭실대학교 컴퓨터학과

e-mail: parkkyoun@lycos.co.kr[○], {bugzigi@daum.net^{*}, bgkim@ssu.ac.kr^{*}}

A Study on Hybrid switching Method of Automatic Voltage Control on Smart-greed

Gwangyun Park[○], Jungryul Kim^{*}, Byunggi Kim^{*}

[○]Dept. of Computer Science, Soongsil University

● 요약 ●

본 연구에서는 수용가에서 에너지 절감과 최대수요전력 제어를 위하여 마이크로프로세서를 이용한 고효율 자동 전압 조정기의 제어 방법에 대하여 제안한다. 제안한 고효율 자동 전압 조정기는 트로이달 코아에 1개의 직렬 권선과 분리된 4개의 분로 권선으로 구성되어 있는 단권 변압기를 사용한다. 변압기의 전압 조절은 직렬 권선과 분로 권선의 연결 방법에 따라 감압/승압이 가능하다. 스위치는 릴레이와 트라이악을 병행하여 사용한다. 스위치의 조작 시 발생하는 권선의 여자돌입전류를 제어하기 위하여 트라이악을 이용 연결 상태를 변경하고 연결 상태 유지 시에는 릴레이를 이용함으로써 스위치 소비 전력을 최소화 한다. 제어 신호는 여자 돌입 전류를 줄이기 위하여 전압 파형에 동기화 하여 제어되며 이를 위하여 소프트웨어 PLL을 사용한다. 소프트웨어 PLL은 전압 파형의 zero-cross, 전압 최고점 등의 시간을 생성한다. 권선 스위치의 제어, 소프트웨어 PLL등 자동 전압 조정기의 제어는 마이크로프로세서에 의해서 이루어진다.

키워드: 스마트그리드(Smart-grid), 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator), 소프트웨어 피엘엘(Software PLL)

I. 서론

온실가스 감축 의무를 부여한 교토의정서 발효와 고유가 상황이 지속됨에 따라 에너지 절약에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 이에 따라 국가에서는 저탄소 녹색성장이라는 슬로건을 내세우고 “녹색성장 5개년 계획”을 발표하여 녹색 산업 분야에 대한 국가투자 계획을 밝혔다. 그리고 2020년까지의 중기 온실가스 감축 목표를 발표하였다. 이러한 계획을 달성하기 위하여 스마트그리드가 중요한 이슈로 떠오르고 있으며 그 중 지능형 소비자는 양방향 통신 인프라를 접목하여 소비자에게 다양한 서비스를 제공함으로써 에너지 효율을 향상시키고 소비자의 자발적인 에너지 소비 절감을 유도시키는 기술이다. 즉, 전기 요금에 반응하여 에너지를 절약하는 가전기기 보급 및 부하 관리를 실현하여 에너지 소비를 절감하도록 유도하는 것이다. 특히, 스마트 미터는 가정에서 전력 사용 패턴 변화를 통하여 에너지 절감에 효과가 있는 것으로 알려져 있다[1, 2].

국내 전력공급의 주를 담당하고 있는 한국전력공사에서는 전기 공급 규정에 따라 AC 207V에서 AC 233V(AC 220V ± 6%) 내에서 전기를 가정에 공급하고 있으며, 배선도중의 전압 강하를 고려하여 통상 전압을 높여서 송전하고 있다. 공급 전압이 높을 경우 공급과잉으로 불필요한 전력을 낭비하는 요인이 된다. Pacific

Northwest analytical team은 공급 전압 관리를 통한 에너지 절감에 대한 연구 보고서를 발표하였다[3]. 보고서에 따르면 배전 시스템에서 전압을 공급 전압 범위의 낮은 쪽으로 공급할 경우 에너지 절감, 수요 감소, 무효 전력 감소의 장점이 있다고 하였다. 특히, 에너지 절감 측면에서 전체적으로 1~3%의 에너지를 절감할 수 있으며, kW 수요는 2~4%, kvar 수요는 4~10%의 에너지를 절감할 수 있다. 하지만, 배전 시스템에서 전체적으로 전압을 낮은 쪽으로 제어 한다면 각 가정에서는 사용하는 전력량에 따라 허용 전압보다 낮게 들어올 위험성이 있다. 따라서 공급되는 전압을 공급 전압 범위 내에서 낮은 쪽으로 각 가정에서 개별적으로 변경할 수 있다면 안정적인 전압을 사용하면서 상당한 에너지를 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 스마트그리드에서의 수용가나 스마트빌딩 참여할 수 있는 크기가 작고 고효율의 다중 스위칭 방식의 자동 전압 조절 방법에 관하여 살펴보고자 한다.

II. 관련 연구

전압 조정기는 전력 시스템에서 널리 사용되는 장치이며 전압 조정기는 전압 탭을 복수개로 설치하고 스위치에 의해 선택적으로 탭을 연결하여 전압을 조정하는 방식으로 이루어져 있다. 특히 자

동 전압 조정기의 경우 스위치는 릴레이를 사용하는 방법과 트라이악이나 SCR(silicon controlled rectifier), IGBT(Insulated gate bipolar transistor)와 같은 솔리드-스테이트(Solid-State) 부품을 사용하는 방법이 있다.

릴레이를 사용한 스위치는 릴레이간의 동작 시간 편차가 있으며 전류가 흐르고 있을 때 릴레이를 구동하면 접점이 손상되는 문제가 있다. 솔리드-스테이트를 이용한 스위치는 동작 시간을 제어할 수 있으며 접점 손상에 대한 위험성이 없다. 하지만 전류에 따라 열이 발생하여 효율이 릴레이보다 떨어지며 열 방출을 위한 방열판이 필요하다. 하지만 효율 보다는 접점 손상이 없고 동작 시간을 제어할 수 있다는 것 때문에 솔리드-스테이트를 스위치로 많이 사용하고 있다.

89C51 마이크로컨트롤러와 복권 변압기, 트라이악을 이용한 자동 전압 조절 방식에서는 입력이 220V일 때 출력 전압은 트라이악의 조합에 따라 0.5V 간격으로 0V ~ 255.5V이다. 스위치 제어 신호는 89C51 MCU와 74LS74, 74LS273, 74LS139를 이용하였으며, MOC3041를 이용하여 전압의 제로-크로싱(zero-crossing)일 때 트라이악 스위치를 구동하였다. 장점은 출력 전압의 오차율이 1V 이내이고 출력 전압 변경시 전압 파형이 정현파에 가깝다는 것이다. 단점으로는 복권 변압기를 사용하여 효율이 떨어진다.[4]

단권 변압기와 IGBT를 이용한 전압 조정기 구조를 제안하고 있다. 입력 전압과 출력 전압의 차이에 따라 IGBT S1, S2, S3를 제어한다. 입력 전압이 120V±20% 일 때 출력 전압을 120V±5%로 조절할 수 있고 부하 용량은 300VA이다. 이 구조는 zero-cross가 아닌 곳에서도 전압 변경이 가능하여 입력 전압 변화에 따른 반응 속도가 전압의 반주기 안으로 빠른 반응 속도가 장점이다. 효율은 95%에서 97% 정도이다.[5]

본 연구에서는 릴레이 스위치와 트라이악 스위치를 조합함으로써 스위치가 연결 상태에 있을 경우 소비 전력을 최소화 하고 스위치 ON/OFF 동작 시 발생하는 권선의 여자돌입전류를 줄이는 전압 조절방식에 있어서 다중 스위칭 방식을 제안한다.

이는 스마트그리드에서의 다양한 기능의 소비자 참여의 한 형태로 볼 수 있으며[6] 수용가 및 스마트빌딩의 경우 전압제어를 통한 소비전력을 줄일 수 있으며, 향후 최대 수요 전력 제어에도 유용한 연구이다.

III. 본론

1. 전압 조절 방식

전압조정권선은 그림 1의 S1~S7의 연결에 따라 각 권선의 연결 순서 및 방향을 구성할 수 있으며, 입력 전압을 승압/감압하여 출력 전압을 발생한다. 높은 효율을 위하여 트로이달(Toroidal) 코어를 사용하였으며 단권 변압기 구조로 되어 있다. CC1은 직렬권선(1차측)을 나타내며 VC1~VC4는 분할된 분로권선(2차측)을 나타낸다.

권선스위치는 전압 조정 권선을 연결하는 스위치회로이다. S1~S7은 릴레이 스위치이고, ST1~ST3는 트라이악 스위치이다.

입력전압 검출회로, 출력전압 검출회로는 입력 전압과 출력 전압을 측정하는 부분이며 입력전압파형 검출 회로는 스위칭을 하기 위한 기준 신호를 생성한다.

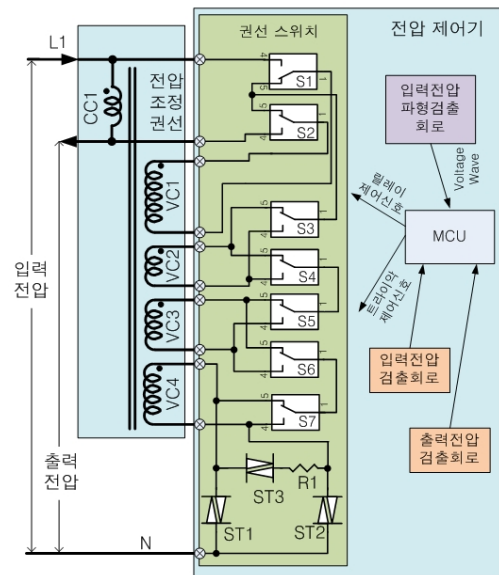


그림 1. 제안하는 자동 전압 조정기 구조
Fig. 1. Proposed AVR Architecture

2. 전압 제어

2.1 분로 권선 변경 타이밍

출력 전압을 조정하기 위하여 분로 권선 연결을 변경할 때 각 릴레이들과 트라이악을 제어하는 신호의 타이밍은 그림 2와 같다. 그림 2의 (a) 지점에서 분로 권선 연결의 변경을 시작한다. (a)에서 트라이악 ST1, ST2, ST3에 신호가 인가된다. 트라이악은 제어 신호가 1로 인가되면 전압과 전류가 0이 아니면 즉시 스위치가 연결되고 신호가 0으로 인가되면 전압이 0V가 되거나 전류가 0일 때 스위치가 끊어진다. 따라서 트라이악의 동작 특성에 의하여 ST3 트라이악은 (a) 지점에서 즉시 스위치가 연결된다. 그러면 R1 저항이 연결되어 VC4 권선을 연결함으로써 각 분로 권선에 과전압이 발생하는 것을 방지한다. 그리고, ST1과 ST2 트라이악은 전압이 0V가 되는 (b) 지점에서 연결이 끊어진다. ST1과 ST2 트라이악이 모두 끊어지면 2차 권선은 개방 상태가 되어 전류가 흐르지 않게 된다. 이 상태에서 (c) 지점에 릴레이를 구동시킨다. 2차 권선에는 전류가 흐르지 않기 때문에 릴레이 동작시 접점간에는 스파크가 발생하지 않아 접점이 소손되는 것을 방지할 수 있다. 릴레이는 릴레이 내부 코일과 접점의 기계적인 동작에서 의해서 (d) 지점 전후에서 스위치가 on 되거나 off 된다. 동작하는 시간은 릴레이의 동작 테스트를 통해서 얻어진 결과이다. 그리고 마지막으로 (e) 지점에서 ST3 트라이악을 끊는 신호가 인가되고 동시에 ST1이나 ST2 트라이악을 연결하는 신호가 인가된다. 그러면 ST1이나 ST2는 즉시 스위치가 연결되고 2차 권선의 연결이 완성되어 출력 전압이 변화한다. ST3은 전압이 0V가 되는 (f)에서 스위치

가 끊어진다.

2차 권선이 연결되는 (e) 지점에서부터 여자돌입전류가 발생하며 전압의 최고점이나 최저점에서 연결되었을 경우 최소 값을 갖는다. 따라서 MCU는 입력 전압 파형에 맞추어서 전압의 최고점에서 2차 권선을 연결한다.

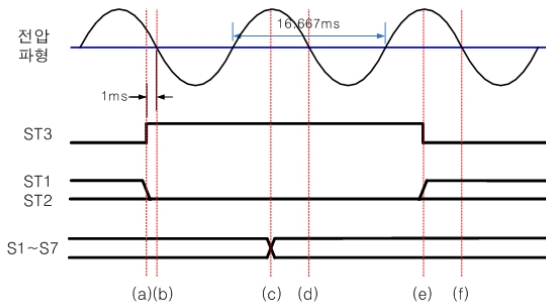


그림 2. 스위치 제어 신호 타이밍도
Fig. 2. Timing Diagram of Switch Control Signal

2.2 소프트웨어 PLL

MCU는 분로 권선 스위치를 제어하기 위하여 입력 전압 파형의 zero-cross 시점과 최고치, 최저치 시점을 알아야 한다. 이를 위하여 MCU는 입력전압파형 검출 회로와 외부 인터럽트, 내부 타이머를 이용한 소프트웨어 PLL을 사용한다. 소프트웨어 PLL은 입력 전압의 파형과 동기화한다. 우리나라에서 사용하는 전원은 60Hz 주파수를 가지고 있다. 본 연구에서 사용하는 소프트웨어 PLL은 55Hz ~ 65Hz 까지의 주파수 영역에 대하여 동기화를 수행하도록 하였다.

2.3 제어 프로그램

MCU는 자동 전압 조정기의 전체 시스템을 제어하는 역할하며 ATMEL사의 ATMEGA32L-8AU를 사용하였다. 제어기의 소비 전력을 줄이기 위하여 3.3V 전압을 이용하였으며, 8MHz clock을 사용하였다.

그림 3은 MCU의 제어 프로그램의 간략한 순서도를 보여준다. 먼저 타이머나 스위치를 제어하기 위한 출력 핀들을 초기화하고 입력 전압을 구한다.

입력 전압에 대하여 전압 조정이 필요한지를 판단 후 전압 조정이 필요 없으면 입력 전압을 구하는 작업을 반복한다. 만일 전압 조정이 필요하다면 권선 스위치를 변경하기 위한 신호를 출력한다.

단권변압기는 권선의 연결이 잘못되었을 경우 권선 내부에 높은 전압이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 출력 전압을 측정하여 예상되는 출력 전압 확인을 통하여 권선 연결 상태를 검증한다. 만일 출력 전압이 예상 출력 전압 범위 내의 값이 아니면 권선 스위치에 문제가 있다고 판단하고 권선 스위치를 BYPASS로 조정하고 더 이상 전압 조정을 수행하지 않는다.

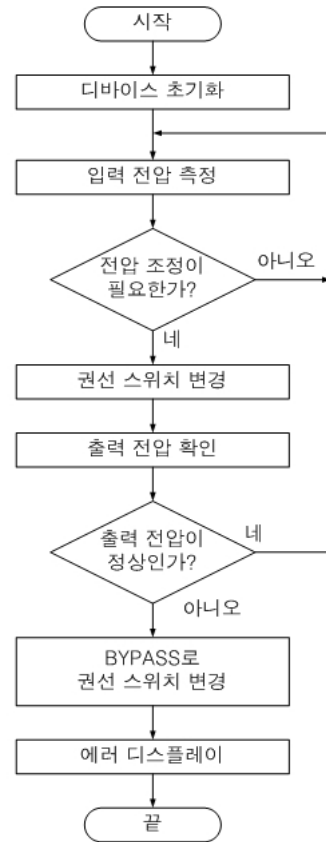


그림 3. MCU 제어 프로그램 순서도
Fig. 3. Flowchart of MCU Control Program

IV. 결론

본 연구에서는 수용가에서 에너지 절감을 위하여 사용할 수 있는 스마트그리드에서의 다중 스위칭 방식의 자동 전압 조절 방법에 관여 살펴보았으며 전압 조정기는 마이크로프로세서에 의하여 제어하였으며, 효율향상과 트랜스의 크기를 줄이기 위하여 트로이달 코어를 이용한 단권변압기를 이용하였다.

각 분로 권선을 연결하기 위한 대부분의 스위치는 소비 전력이 적은 릴레이를 사용하였으며 분로 권선의 연결 시점을 정확하게 제어하기 위하여 마지막 스위치만 트라이악을 사용하였다. 분로 권선 스위치들의 제어 신호는 여자 돌입 전류를 줄이기 위하여 전압 파형에 동기화 하고 전압 파형에 동기화를 위하여 제어기에서는 소프트웨어 PLL을 사용하였다. 소프트웨어 PLL은 전압 파형과 동기화 하여 전압 파형의 zero-cross, 전압 최고점 등의 시간을 생성하여 권선 스위치들의 제어 신호 시점을 결정한다.

본 연구에서 다중 스위칭 방식의 자동 전압 조절의 실험을 위하여 6kVA 변압기를 이용하였으며, 실험 결과 전압 조정기에서 사용하는 자체 소비 전력은 최대 1W 정도이며 변압기의 동손 및 철손을 포함한 자체 손실은 최대 4.5W 이다. 입력 전압 188V에서 233V 일 경우 출력 전압은 208V에서 215V로 조정된다. 효율을 변압기 용량 내에서 최소 99.5%로 측정되었고 전압 조정기의 평

균 효율 96.4%나 일반적인 전압 조정기의 최대 효율 97.5%보다 [5] 높음을 확인할 수 있었다. 또한 전압 조정 시점을 전압의 최고점에 동기화함으로써 여자돌입전류가 발생하지 않는다는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 다중 스위칭 방식의 자동 전압 조절 방법을 수용가나 스마트 빌딩 등의 스마트그리드에서의 소비자 측에 적용할 경우 사용 전력을 절감할 수 있으며 향후 공급자의 정보통신 기술과 접목하여 최대수요전력 제어에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] David Crossley, "Advanced Metering for Energy Supply in Australia," Energy Future Australia Pty Ltd, Australia, Jul., 2007.
- [2] Rob van Gerwen, Saskia Jaarsma and Rob Wilhie, "Smart Metering," KEMA, Netherlands, Jul., 2008.
- [3] R. W. Beck, "Distribution Efficiency Initiative," Northwest Energy Efficiency Alliance, Dec. 2007, www.rwbeck.com/nea
- [4] Niu Yixia, Song Jijiang, sui Ruihong, "Design of Regulator Digitally Controlled With 89C51 SCM," International Conference on electronic Measurement and Instruments", pp. 4-511 - 4-515, July, 2007.
- [5] C. Hernandez, G. Gallegos, N. Vazquez, E. Rodriguez, R. Orosco, "A different AC Voltage Regulator Based on Tapped Transformer," Power Electronics Congress(CIEP, 2010 12th International, pp. 180-184, August, 2010.
- [6] 이경복 "스마트 그리드에서의 소비자 참여와 보안 이슈" 정보보호학회지, 제19권 제4호, Aug, 2009.