

# ANPC 인버터를 활용한 계통 전압 지원 알고리즘

강동윤<sup>1</sup>, 유비<sup>1</sup>, 최현준<sup>2</sup>, 박화평<sup>1</sup>  
 금오공과대학교 전자공학부<sup>1</sup>  
 한국전자기술연구원<sup>2</sup>

e-mail : hppark@kumoh.ac.kr

## Smart Inverter Algorithm using ANPC Inverter for Grid Voltage Support

Dong Yun Kang<sup>1</sup>, Bi Yu<sup>1</sup>, HyunJun Choi<sup>2</sup>, Hwa-Pyeong Park<sup>1</sup>  
 Kumoh National Institute of Technology<sup>1</sup>  
 Korea Electronics Technology Institute<sup>2</sup>

### 요약

환경문제에 따른 탄소 중립의 중요성이 커지고 있어 신재생에너지를 활용하는 분산에너지원(DER)이 증가하고 있다. 하지만 신재생에너지의 증가는 불규칙적인 전력 생산과 전력 계통의 도선 및 부하 임피던스에 의한 전압 및 주파수 변동으로 전압의 변동을 일으키며, 이는 그리드 안정성과 전력 품질 저하로 이어진다. 이러한 문제를 극복하기 위해 계통 연계형 스마트 인버터를 사용하여 신재생에너지를 사용함과 동시에 계통의 안전성을 높일 수 있다. 본 논문에서는 전압 안정화를 위한 스마트 인버터의 Volt-Watt, Volt-Var 및 Volt - Var와 결합된 Volt - Watt 제어 방법을 제안한다.

### 1. 서론

세계 각국의 탄소 중립 선언을 통해 정부에서는 2050 탄소 중립을 추진하고 있어 태양광 발전, 풍력 발전 등 친환경 에너지원과 재생 에너지를 활용하는 분산 에너지 자원(Distributed Energy Resource, DER)의 중요성이 커지고 있다. 불규칙적인 생산 변동성과 산업이 고도화되면서 소비하는 전력량이 급격하게 증가함에 따라 계통 불안정을 야기하여 전력 계통에 부담이 커진다. 이에 전력망의 안정성을 유지하고 분산 에너지 자원의 증가로 인한 전압 및 주파수의 변동을 방지하기 위해 능동적으로 대응할 수 있는 스마트 인버터가 제안되었다. 이에 계통의 신뢰성과 안정성을 증가하기 위한 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 Volt-Var, Volt-Watt, Volt - Var와 결합된 Volt - Watt 제어 알고리즘을 통해 계통의 안정성을 높이고자 한다.

### 2. 스마트 인버터 제어 알고리즘

#### 2.1 Volt-Var 제어

과도한 무효 전력 공급 또는 부족은 grid 내의 전압이 비정상적으로 변동되게 하며 불필요한 스트레스를 만들어 심각한 경우 장비를 파손시킬 수 있다. 따라서 전압 변동에 따른 무

| Voltage-reactive power parameters | Default settings                                   | Ranges of allowable settings                            |   |
|-----------------------------------|--|---|---|
|                                   |  | Minimum   | Maximum   |
| $V_{ref}$                         | $V_N$  | $0.95 V_N$  | $1.05 V_N$  |
| $V_2$                             | $V_{ref} - 0.02 V_N$                               | $V_{ref} - 0.03 V_N$                                    | $V_{ref}$   |
| $Q_2$                             | 0  | 100% of nameplate reactive power capability, absorption | 100% of nameplate reactive power capability, absorption |
| $V_3$                             | $V_{ref} + 0.02 V_N$                               | $V_{ref}$   | $V_{ref} + 0.03 V_N$                                    |
| $Q_3$                             | 0  | 100% of nameplate reactive power capability, injection  | 100% of nameplate reactive power capability, injection  |
| $V_1$                             | $V_{ref} - 0.08 V_N$                               | $V_{ref} - 0.18 V_N$                                    | $V_2 - 0.02 V_N$  |
| $Q_1$                             | 44% of nameplate apparent power rating, injection  | 0   | 100% of nameplate reactive power capability, injection  |
| $V_4$                             | $V_{ref} + 0.08 V_N$                               | $V_3 + 0.02 V_N$  | $V_{ref} + 0.18 V_N$                                    |
| $Q_4$                             | 44% of nameplate apparent power rating, absorption | 100% of nameplate reactive power capability, absorption | 0   |
| Open loop response time           | 5s   | 1s  | 90s   |

표 1 IEEE Std 1547TM-2018에 규제된 규격 (Category B)

$$V_{ref} = V_N = 220 V = 1pu$$

$$V_1 = V_{ref} - 0.08 \times V_N = 220 - (0.08 \times 220) = 202.4 V = 0.92pu$$

$$V_2 = V_{ref} - 0.02 \times V_N = 220 - (0.02 \times 220) = 215.6 V = 0.98pu \quad (1)$$

$$V_3 = V_{ref} + 0.02 \times V_N = 220 + (0.02 \times 220) = 224.4 V = 1.02pu$$

$$V_4 = V_{ref} + 0.08 \times V_N = 220 + (0.08 \times 220) = 237.6 V = 1.08pu$$

무효 전력의 조정을 통해 안정성을 유지하는 Volt-Var 제어가 필요하며 표 1은 IEEE Std 1547TM-2018 규격서의 카테고리 B를 기준으로  $V_N = 220 V$  지정 후, 식 (1), (2)을 나타내고, 그림 1은 식을 통한 그래프를 나타낸다.

$$Q_1(V_t < V_1) = 1.32KVar$$

$$Q_2(V_1 \leq V_t < V_2) = \frac{Q_3 - Q_1}{V_2 - V_1}(V_{real} - V_2) = -\frac{1.32KVar}{13.2}(V_{real} - V_2)$$

$$Q_3(V_2 \leq V_t < V_3) = 0KVar$$

$$Q_4(V_3 \leq V_t < V_4) = \frac{Q_5 - Q_3}{V_4 - V_3}(V_{real} - V_3) = -\frac{1.32KVar}{13.2}(V_{real} - V_3)$$

$$Q_5(V_4 \leq V_t) = -1.32KVar$$

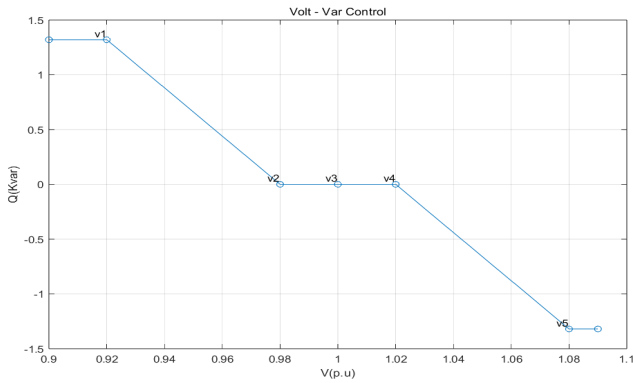


그림 1 규격 기준에 따른 그래프(Volt-Var 제어)

## 2.2 Volt-Watt 제어

Volt-Watt 제어는 전압 변동에 따른 출력 전력의 조정을 통해 구동한다. 표 2는 IEEE Std 1547TM-2018 규격서의 카테고리 B로  $V_N = 220 V$  지정 후, 식 (3), (4)을 나타내고, 그림2는 식을 통한 그래프를 나타낸다.

| Voltage-active power parameters                                     | Default settings                       | Ranges of allowable settings |             |
|---|--|------------------------------|-------------|
|   |  | Minimum                      | Maximum     |
| $V_1$   | $1.06 V_N$                             | $1.05 V_N$                   | $1.09 V_N$  |
| $P_1$   | $P_{rated}$                            | $N/A$                        | $N/A$       |
| $V_2$   | $1.1 V_N$                              | $V_1 + 0.01 V_N$             | $1.10 V_N$  |
| $P_2$ (applicable to DER that can only generate active power)       | The lesser of $P_{rated}$ or $P_{min}$ | $P_{min}$                    | $P_{rated}$ |
| $P_3$ (applicable to DER that can generate and absorb active power) | 0                                      | 0                            | $P_{rated}$ |
| Open loop response time   | 10s                                    | 0.5s                         | 60s         |

표 2 IEEE Std 1547TM-2018에 규제된 규격

$$V_1 = V_N = 220 V = 1pu$$

$$V_2 = 1.06 \times V_N = 1.06 \times 220 = 233.2 V = 1.06pu \quad (3)$$

$$V_3 = 1.1 \times V_N = 1.1 \times 220 = 242 V = 1.1pu$$

$$P_1(V_t < V_2) = 15kw$$

$$P_2(V_2 \leq V_t < V_3) = \frac{P_3 - P_1}{V_2 - V_1}(V_{real} - V_3) = -\frac{15kw}{8.8}(V_{real} - V_3)$$

$$P_3(V_3 \leq V_t) = 0kw$$

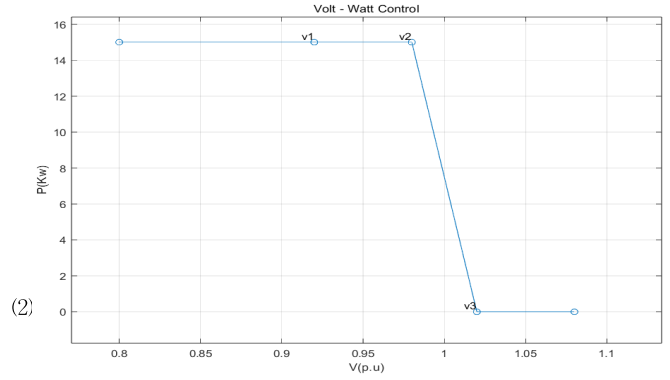


그림 2 규격 기준에 따른 그래프(Volt-Watt 제어)

## 2.3 Volt-Var와 결합된 Volt-Watt 제어

Volt-Var 제어와 Volt-Watt 제어 방법을 결합하는 제어를 제안한다. 제안하는 제어를 통해 효율성과 다양한 상황에 대응할 수 있는 유연성이 향상된다. 식 (1), (2), (3), (4)를 활용하여  $V_4$  이전에는 Volt - Var 제어가 되고  $V_4$  이후에는 Volt - Watt 제어가 가능하도록 식 (5)과 식 (6)을 나타냈다. 그림 3은 식 (5), (6)에 따른 그래프로 과량 축은 전압에 대한 무효 전력 값이고, 주황 축은 전압에 대한 유효전력 값이다. 그림 5의 제어 곡선을 적용하면 전압에 따른 과전압 상황에서 전압을 효과적으로 안정시킬 수 있다.

$$V_{ref} = V_N = 220 V = 1pu$$

$$V_1 = V_{ref} - 0.08 \times V_N = 220 - (0.08 \times 220) = 202.4 V = 0.92pu$$

$$V_2 = V_{ref} - 0.02 \times V_N = 220 - (0.02 \times 220) = 215.6 V = 0.98pu$$

$$V_3 = V_{ref} + 0.02 \times V_N = 220 + (0.02 \times 220) = 224.4 V = 1.02pu$$

$$V_4 = V_{ref} + 0.08 \times V_N = 220 + (0.08 \times 220) = 237.6 V = 1.08pu$$

$$V_5 = 1.1 \times V_N = 1.1 \times 220 = 242 V = 1.1pu$$

$$V_t < V_1,$$

$$Q_1 = 1.32KVar$$

$$P_1 = 15kw$$

$$V_1 \leq V_t < V_2,$$

$$Q_2 = -\frac{1.32KVar}{13.2}(V_{real} - V_2)$$

$$P_2 = 15kw$$

$$V_2 \leq V_t < V_3,$$

$$Q_3 = 0KVar$$

$$P_3 = 15kw$$

$$V_3 \leq V_t < V_4,$$

$$Q_4 = -\frac{1.32KVar}{13.2}(V_{real} - V_3)$$

$$P_4 = 15kw$$

$$V_4 \leq V_t < V_5,$$

$$Q_5 = -1.32KVar$$

$$P_5 = -\frac{15kw}{4.4}(V_{real} - V_5)$$

$$V_5 \leq V_t,$$

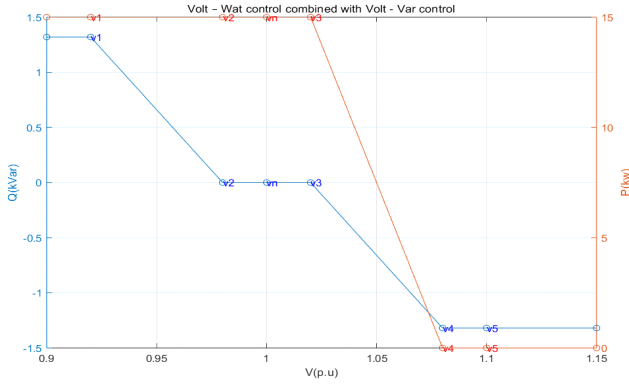


그림 3 기준에 따른 그래프(Volt - Var와 결합 된 Volt - Watt 제어)

3. PSIM 시뮬레이션 구현

시뮬레이션 툴로 PSIM을 사용하였으며, 그림 4는 15kVA 급 ANPC 인버터를 구현한 것으로 직류 전압( $V_{dc}$ )은 650V, 계통 선간 전압은 380V, 계통 주파수는 60Hz, 스위칭 주파수는 50kHz로 설정하고 전류리플률(RF)을 10%로 설정하여 인버터 측 인덕터( $L_1$ )를 0.288mH로 설계하고 시스템의 정격 및 역률을 고려하여 무효전력 흡수율은 5%로 설정해 커패시터는 13.77 $\mu$ F로 설계하였다. 전류 리플 감쇠(Current Ripple Attenuation)는 10%로 설정하여 계통 측 인덕터( $L_2$ ) 8.064 $\mu$ H, 댐핑저항은 0.252 $\Omega$  으로 설계하여 계통연계 인버터의 안정도를 향상시킨다. 모든 제어는 0.5초에서 시작하며 0.7초 이후에 변동하는 상황으로 흐른다고 가정한다. 식 (7)은  $I_q$ 값을 구하는 식이다.

$$I_q = \frac{V_q}{V_d} I_d - \frac{2Q}{V_d} \tag{7}$$

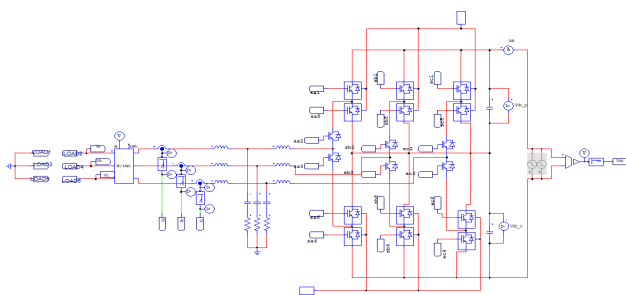


그림 4 15kVA 급 ANPC 인버터

계통 전압  $V_t < V_1$  인 경우의 Volt - Var 제어 시뮬레이션 결과로 무효 전력 값이 0.5초부터 0.7초까지는 정상 작동을 하여 무효 전력  $Q = 0 \text{ Var}$  이며, 0.7초 후에는 전압 강하로 인해  $Q = 13.2k \text{ Var}$  이 되는 것이 그림 5 (a)에 나타나고 식 (7)으로 계산한  $I_q$ 가 -9.35A로 시뮬레이션 값과 같게 나오는 것을 확인하였다. 그림 5 (b)는 계통 전압이  $V_2 \leq V_t < V_3$  인 경우로  $V_t = 237V = 1.077pu$ 로 가정하였으며 Volt - Watt로

나타낸 것으로  $I_d = 51.8A$ ,  $I_q = 0A$  로 값이 유사하게 나오는 것을 확인하였다.

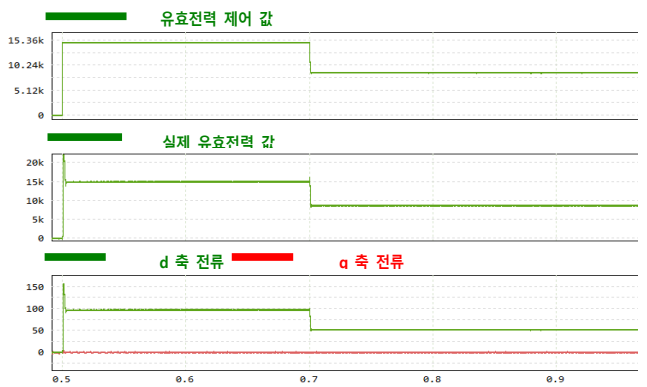


그림 5 시뮬레이션 결과 (a) Volt-Var 제어 (b) Volt-Watt 제어

Volt-Var, Volt-Watt 결합 제어는 그림 6에서 계통 전압이  $V_t = 250V = 1.136pu$  로 가정하였으며  $V_5 \leq V_t$  인 구간으로 시뮬레이션하였다. 0.5초 후부터  $Q = -1.32k \text{ Var}$ ,  $P = 0kw$  로 제어가 되는 것을 확인하였고  $I_d$ 는 0A,  $I_q$ 는 7.47A로 나온다.

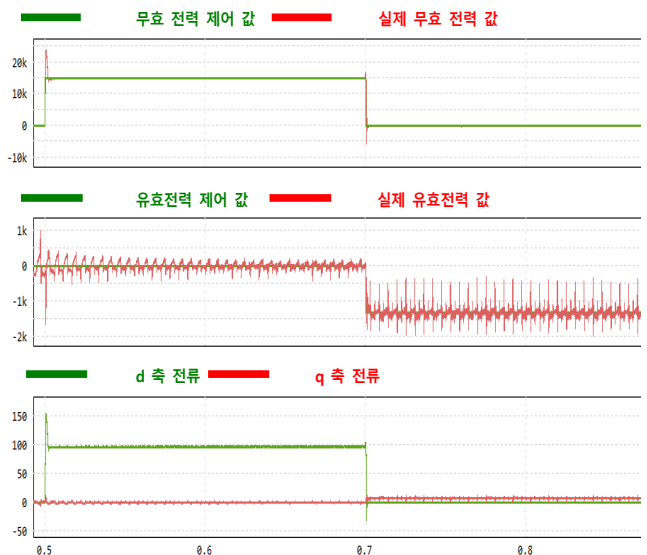


그림 6 Volt-VAR, Volt-Watt 결합 제어

#### 4. 결론

본 논문에서는 스마트 인버터의 Volt-Var 제어와 Volt-Watt 제어를 결합하여 연계점 전압을 안정시키는 방법을 제안하였다. Volt-Var 제어는 무효 전력을, Volt-Watt 제어는 유효전력을 제어하고 Volt-Var 및 Volt-Watt의 결합 제어는 유도성 무효 전력을 최대로 제어함과 동시에 유효전력을 감소시킨다. 두 기법을 결합한 제어 방법은 연계점 전압을 효과적으로 안정화하는 것을 확인했다. 제안하는 방법의 성능은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

#### 참고문헌

- [1] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces
- [2] Combined Volt-VAR and Volt-Watt Control for PCC Voltage stabilization in Smart Inverter, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 72, no. 6, pp. 739~746, 2023
- [3] Grid Voltage and Frequency Control Algorithm using Smart Inverter ,전력전자학술대회논문집 2020.8.18~20